Armée suisse

65.90/I f

Instructions techniques fondamentales pour mécaniciens d'appareils de transmission

Volume I

COURS D'ELECTRONIQUE

Valable dès le 1er octobre 1974

Armée suisse

65.90/I f

Instructions techniques fondamentales pour mécaniciens d'appareils de transmission

Volume I

Valable dès le 1er octobre 1974

11.76 5000 48642

Distribution

Exemplaires personnels :

- aux élèves officiers des troupes de réparation

- aux élèves sous-officiers des catégories de mécaniciens mentionnées ci-après :

- à tous les :
  - mécaniciens d'appareils de transmission
  - mécaniciens d'appareils d'artillerie
  - mécaniciens d'appareils d'engins filoguidés antichars
  - mécaniciens d'appareils électroniques d'avions
  - mécaniciens d'appareils de transmission d'aviation
  - mécaniciens d'appareils de radar
  - mécaniciens d'appareils d'engins guidés
  - mécaniciens d'appareils de défense contre avions
  - mécaniciens d'appareils météorologiques
  - mécaniciens de stabilisateurs

Table des matières

		Page
A.	**Les bases physiques**	11
I.	La nature de la matière	11
	1. Introduction	11
	2. Que savez-vous concernant la matière ?	11
	3. La constitution de la matière	11
	4. L'essentiel	15
	5. Exercices de répétition	15
II.	Electricité	16
	1. Introduction	16
	2. Que savez-vous au sujet de l'électricité ?	16
	3. La nature de l'électricité	16
	4. L'essentiel	18
	5. Exercices de répétition	18
III.	Le circuit électrique	19
	1. Introduction	19
	2. Que savez-vous au sujet du circuit électrique ?	19
	3. Le circuit électrique et ses caractéristiques	19
	4. Exemples	26
	5. L'essentiel	29
	6. Exercices de répétition	30
B.	**Sources de courant électrochimiques**	33
I.	Eléments galvaniques	33
	1. Introduction	33
	2. Que savez-vous au sujet des éléments galvaniques ?	33
	3. L'élément galvanique	33
	4. Exemples	36
	5. L'essentiel	38
	6. Exercices de répétition	38
II.	Les accumulateurs	40
	1. Introduction	40
	2. Que savez-vous au sujet des accumulateurs ?	40
	3. Les accumulateurs	40
	4. Exemples	43
	5. L'essentiel	48
	6. Exercices de répétition	49
C.	**Le magnétisme**	51
I.	Les aimants permanents	51
	1. Introduction	51
	2. Que savez-vous au sujet des aimants permanents ?	51
	3. L'aimant permanent	51
	4. L'essentiel	55
	5. Exercices de répétition	55

Page

II. Electromagnétisme 56
1. Introduction 56
2. Que savez-vous au sujet de l'électromagnétisme ? 56
3. L'électromagnétisme 56
4. L'essentiel 73
5. Exercices de répétition 73

D. Les principes fondamentaux de la trigonométrie 75
I. Les fonctions trigonométriques 75
1. Introduction 75
2. Que savez-vous au sujet des fonctions trigonométriques ? 75
3. Les fonctions trigonométriques 75
4. Exemples 80
5. L'essentiel 83
6. Exercices de répétition 84

II. Les fonctions trigonométriques sur la règle à calcul 85
1. Introduction 85
2. Que savez-vous au sujet des fonctions trigonométriques sur la règle à calcul ? 85
3. Les fonctions trigonométriques sur la règle à calcul 85
4. Exemples 89
5. L'essentiel 91
6. Exercices de répétition 92

E. Courants alternatifs 93
I. Le courant alternatif monophasé 93
1. Introduction 93
2. Que savez-vous au sujet des courants alternatifs ? 93
3. Le courant alternatif 93
4. Exemples 103
5. L'essentiel 105
6. Exercices de répétition 105

II. Le courant triphasé 107
1. Introduction 107
2. Que savez-vous concernant le courant triphasé ? 107
3. Le courant triphasé 107
4. Exemples 116
5. L'essentiel 118
6. Exercices de répétition 118

F. Les composants linéaires 121
I. Résistances 121
1. Introduction 121
2. Que savez-vous concernant les résistances ? 121
3. Les résistances 121
4. Exemples 131
5. L'essentiel 132
6. Exercices de répétition 133

		Page
II.	Condensateurs	134
	1. Introduction	134
	2. Que savez-vous au sujet des condensateurs ?	134
	3. Les condensateurs	134
	4. Exemples	166
	5. L'essentiel	170
	6. Exercices de répétition	171
III.	Bobines	172
	1. Introduction	172
	2. Que savez-vous au sujet des bobines ?	172
	3. Bobines	172
	4. Exemples	193
	5. L'essentiel	195
	6. Exercices de répétition	196
IV.	Circuit série composé de résistances et de réactances	197
	1. Introduction	197
	2. Que savez-vous au sujet des circuits composés de réactances et de résistances en série ?	197
	3. Circuit série composé de résistances et de réactances	197
	4. Exemples	211
	5. L'essentiel	222
	6. Exercices de répétition	223
V.	La mise en parallèle de résistances et de réactances	224
	1. Introduction	224
	2. Que savez-vous concernant la mise en parallèle de résistances et de réactances	224
	3. La mise en parallèle de résistances et de réactances	224
	4. Exemples	231
	5. L'essentiel	240
	6. Exercices de répétition	241
VI.	Le transformateur	242
	1. Introduction	242
	2. Que savez-vous concernant le transformateur ?	242
	3. Le transformateur	242
	4. Exemples	260
	5. L'essentiel	265
	6. Exercices de répétition	265
VII.	Le circuit oscillant série	267
	1. Introduction	267
	2. Que savez-vous au sujet des circuits oscillants série ?	267
	3. Le circuit oscillant série	268
	4. Exemples	275
	5. L'essentiel	280
	6. Exercices de répétition	280

		Page
VIII	Le circuit oscillant parallèle	282
	1. Introduction	282
	2. Que savez-vous au sujet du circuit oscillant parallèle ?	282
	3. Le circuit oscillant parallèle	282
	4. Exemples	294
	5. L'essentiel	300
	6. Exercices de répétition	301
IX.	Les filtres de bande	302
	1. Introduction	302
	2. Que savez-vous au sujet des filtres de bande ?	303
	3. Les filtres de bande	303
	4. Exemple	313
	5. L'essentiel	315
	6. Exercices de répétition	315
G. Tubes électroniques		317
I.	La diode	317
	1. Introduction	317
	2. Que savez-vous au sujet des diodes ?	317
	3. La diode	318
	4. Exemples	330
	5. L'essentiel	332
	6. Exercices de répétition	332
II.	La triode	334
	1. Introduction	334
	2. Que savez-vous au sujet des triodes ?	334
	3. La triode	334
	4. Exemple	342
	5. L'essentiel	344
	6. Exercices de répétition	344
III.	La pentode	347
	1. Introduction	347
	2. Que savez-vous au sujet de la pentode ?	348
	3. La pentode	348
	4. Exemple	354
	5. L'essentiel	355
	6. Exercices de répétition	357
IV.	La pentode de puissance	358
	1. Introduction	358
	2. Que savez-vous au sujet des pentodes de puissance ?	358
	3. La pentode de puissance	358
	4. Exemple	362
	5. L'essentiel	364
	6. Exercices de répétition	364

		Page
V.	Le tube mélangeur	365
	1. Introduction	365
	2. Que savez-vous au sujet des tubes mélangeurs ?	365
	3. Principes de base des étages mélangeurs	365
	4. Les tubes mélangeurs	368
	5. Exemple	374
	6. L'essentiel	375
	7. Exercices de répétition	376
VI.	Tubes à atmosphère gazeuse	378
	1. Introduction	378
	2. Que savez-vous au sujet des tubes à atmosphère gazeuse ?	378
	3. Tubes à gaz (à atmosphère gazeuse)	378
	4. L'essentiel	402
	5. Exercices de répétition	403
VII.	Le tube à rayons cathodiques	404
	1. Introduction	404
	2. Que savez-vous au sujet du tube à rayons cathodiques ?	404
	3. Le tube à rayons cathodiques	404
	4. Exemple	409
	5. L'essentiel	411
	6. Exercices de répétition	411
VIII.	Désignation des tubes	412
	1. Introduction	412
	2. Code de désignation des tubes à vide	412
	3. Exemples	412
H.	**Dispositions finales**	500

Appendice

Réponses aux questions posées dans le texte

1.	Que savez-vous de ce qui concerne la matière ?	413
2.	Exercices de répétition concernant « I. La nature de la matière »	413
3.	Que savez-vous au sujet de l'électricité ?	415
4.	Exercices de répétition concernant « II. Electricité »	416
5.	Que savez-vous au sujet du circuit électrique ?	416
6.	Exercices de répétition concernant « III. Le circuit électrique »	417
7.	Que savez-vous au sujet des éléments galvaniques ?	421
8.	Exercices de répétition concernant « I. Eléments galvaniques »	422
9.	Que savez-vous au sujet des accumulateurs ?	424
10.	Exercices de répétition concernant « II. Accumulateurs »	424
11.	Que savez-vous au sujet des aimants permanents ?	425
12.	Exercices de répétition concernant « I. Aimants permanents »	426

Page

13. Que savez-vous au sujet de l'électromagnétisme ? 427
14. Exercices de répétition concernant « II. Electromagnétisme » 427
15. Que savez-vous au sujet des fonctions trigonométriques ? 430
16. Exercices de répétition concernant « I. Fonctions trigonométriques » 431
17. Que savez-vous au sujet des fonctions trigonométriques sur la règle à calcul ? 433
18. Exercices de répétition concernant « II. Les fonctions trigonométriques sur la règle à calcul » 433
19. Que savez-vous au sujet des courants alternatifs ? 435
20. Exercices de répétition concernant « I. Le courant alternatif » 436
21. Que savez-vous au sujet du courant triphasé ? 439
22. Exercices de répétition concernant « II. Courant triphasé » 440
23. Que savez-vous au sujet des résistances ? 444
24. Exercices de répétition concernant « I. Résistances » 445
25. Que savez-vous au sujet des condensateurs ? 447
26. Exercices de répétition concernant « II. Condensateurs » 448
27. Que savez-vous au sujet des bobines ? 451
28. Exercices de répétition concernant « III. Bobines » 452
29. Que savez-vous au sujet des circuits composés de réactances et de résistances en série 456
30. Exercices de répétition concernant « IV. Circuit série composé de résistances et de réactances » 457
31. Que savez-vous concernant la mise en parallèle de résistances et de réactances ? 461
32. Exercices de répétition concernant « V. La mise en parallèle de résistances et de réactances » 463
33. Que savez-vous concernant le transformateur ? 469
34. Exercices de répétition concernant « VI. Le transformateur » 469
35. Que savez-vous au sujet du circuit oscillant série ? 471
36. Exercices de répétition concernant « VII. Le circuit oscillant série » 471
37. Que savez-vous au sujet du circuit oscillant parallèle ? 474
38. Exercices de répétition concernant « VIII. Le circuit oscillant parallèle » 475
39. Que savez-vous au sujet des filtres de bande ? 476
40. Exercices de répétition concernant « IX. Filtres de bande » 477
41. Que savez-vous au sujet des diodes ? 479
42. Exercices de répétition concernant « I. La diode » 480
43. Que savez-vous au sujet des triodes ? 482
44. Exercices de répétition concernant « II. La triode » 483
45. Que savez-vous au sujet de la pentode ? 486
46. Exercices de répétition concernant « III. La pentode » 487
47. Que savez-vous au sujet de la pentode de puissance ? 489
48. Exercices de répétition concernant « IV. La pentode de puissance » 490
49. Que savez-vous au sujet des tubes mélangeurs ? 491
50. Exercices de répétition concernant « V. Les tubes mélangeurs » 492
51. Que savez-vous au sujet des tubes à atmosphère gazeuse ? 494
52. Exercices de répétition pour « VI. Tubes à atmosphère gazeuse » 494
53. Que savez-vous au sujet du tube à rayons cathodiques ? 497
54. Exercices de répétition concernant « VII. Le tube à rayons cathodiques » 497

Index alphabétique voir volume II

Règlement du chef de l'instruction
concernant

Instructions techniques fondamentales pour mécaniciens d'appareils de transmission

Volume I

(du 31 octobre 1972)

édicté en vertu de l'article 5, alinéa 2, lettre a de l'Ordonnance du Département militaire fédéral du 2 juin 1969 concernant l'émission de règlements militaires.

Introduction

Le présent règlement répond au besoin de disposer d'un moyen d'enseignement pour l'instruction de base de tous les mécaniciens d'appareils électroniques de la troupe. Pour les nouveaux mécaniciens d'appareils de transmission, au sens large du terme, certaines parties de cet ouvrage d'études présentent des faits connus tandis que d'autres chapitres expliquent des phénomènes qui sont parfois inconnus ou qui n'ont été que partiellement étudiés selon le genre de la préparation professionnelle acquise.
Dans la méthode d'enseignement de l'électronique qui en est résultée ici, on renonce intentionnellement à l'emploi de développements mathématiques pour placer l'expérimentation au premier plan. En illustrant la description des expériences de base, telles qu'elles seront pratiquées pour la plupart des cours de l'enseignement, cet ouvrage sert d'une part de répétition des cours et, d'autre part, permet une étude personnelle sommaire. Cette dernière exigence est particulièrement favorable à l'homogénéisation des classes d'enseignement composées d'élèves ayant des formations différentes. L'introduction des chapitres « Que savez-vous au sujet de ?... » est spécialement prévue pour l'étude personnelle, de même que la répétition des exercices à la fin de chaque chapitre. Les solutions et leur appréciation sont rassemblées dans l'appendice afin de permettre son propre contrôle.

A. Les bases physiques

I. La nature de la matière

1. Introduction

La compréhension de la nature de l'électricité et des différentes formes sous lesquelles elle se manifeste nécessite l'étude de la constitution de la matière. Au cours des cent dernières années les secrets de la constitution et de la composition de la matière ont été arrachés petit à petit et avec peine à la nature. Cependant, la science n'est pas encore parvenue à rendre visibles les plus petites particules élémentaires bien que leur existence soit prouvée par l'expérimentation. Le comportement physique des particules élémentaires a souvent été prévu sur la base de théories et de calculs alors que l'expérimentation fournissait uniquement la preuve de l'exactitude de la théorie. L'image, que l'homme moderne se fait du monde, est empreinte de manière déterminante par les connaissances de la physique actuelle.
Dans les chapitres suivants nous nous intéresserons suffisamment aux propriétés et au comportement des particules élémentaires pour que nous puissions comprendre l'électronique.

2. Que savez-vous concernant la matière ?
(solutions page 413)

Chacun des chapitres suivants commence par des questions préliminaires auxquelles il vous faut répondre sans recourir à une aide extérieure. Vous trouverez les réponses à ces questions d'initiation et leur taxation en appendice (page 413).

a) De quelle polarité est la charge d'un électron ?
b) Où pouvons-nous trouver des protons ?
c) Des neutrons se trouvent-ils dans le noyau atomique ?
d) Qu'entendez-vous par la notion d'« Atome » ?
e) Les ions jouent-ils un rôle dans les tubes à gaz ?
f) L'oxygène est-il un élément chimique ?

3. La constitution de la matière

Si l'on divise une matière quelconque en particules de plus en plus petites, on obtient finalement la plus petite particule qui présente encore les propriétés de la matière : la *molécule*. Une molécule de sel de cuisine, par exemple, possède encore les propriétés chimiques et physiques du sel de cuisine. Une division ultérieure n'est toutefois plus possible.
La molécule se compose de divers *atomes* assemblés. L'atome est la plus petite unité d'un *élément chimique*. A ce jour, plus de cent éléments chimiques, ou matières de base, sont connus.

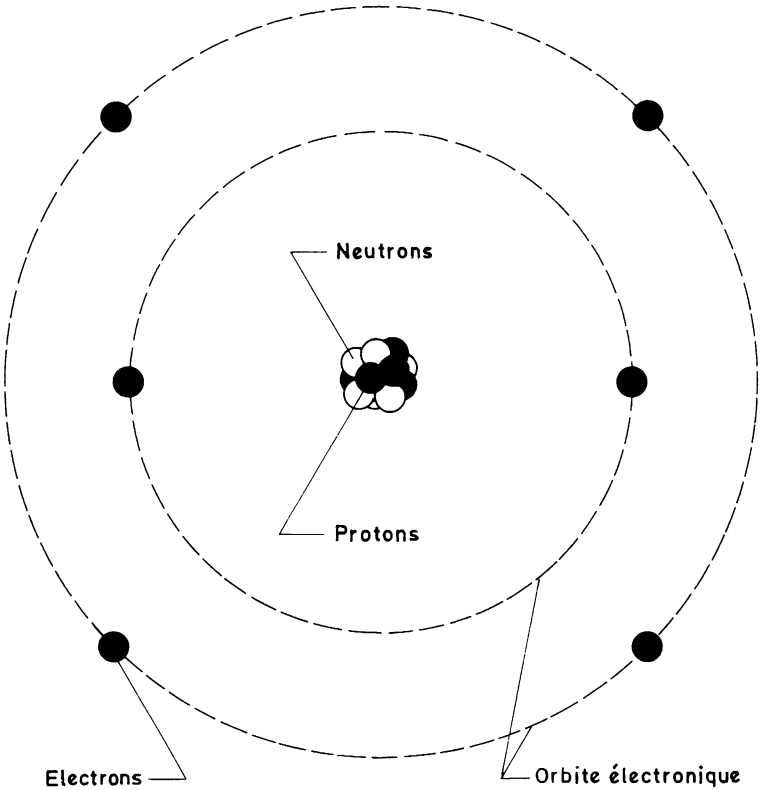


Figure 1 : Structure du noyau de carbone

Longtemps l'atome fut considéré comme indivisible. La science résolut cependant l'énigme de la structure de l'atome et fit ainsi le premier pas vers la transmutation atomique. Nous allons analyser de plus près la composition de l'atome, car certains de ses constituants sont les véritables porteurs de l'électricité.

La figure 1 nous montre la structure du noyau de carbone. Chaque atome se compose d'un noyau atomique et d'électrons qui tournent autour de ce noyau comme des planètes. Le noyau est constitué de *protons* et de *neutrons*. Les constituants les plus importants de la matière possèdent les propriétés suivantes :

L'*électron* est le porteur de la plus petite charge unitaire d'électricité dénommée *charge élémentaire*. La polarité de cette charge est *négative*. L'électron est léger par rapport aux composants du noyau, il pèse environ deux mille fois moins qu'un proton.

Le *proton* présente une charge *positive* de valeur égale à la charge élémentaire. Avec les neutrons, il forme le noyau atomique.

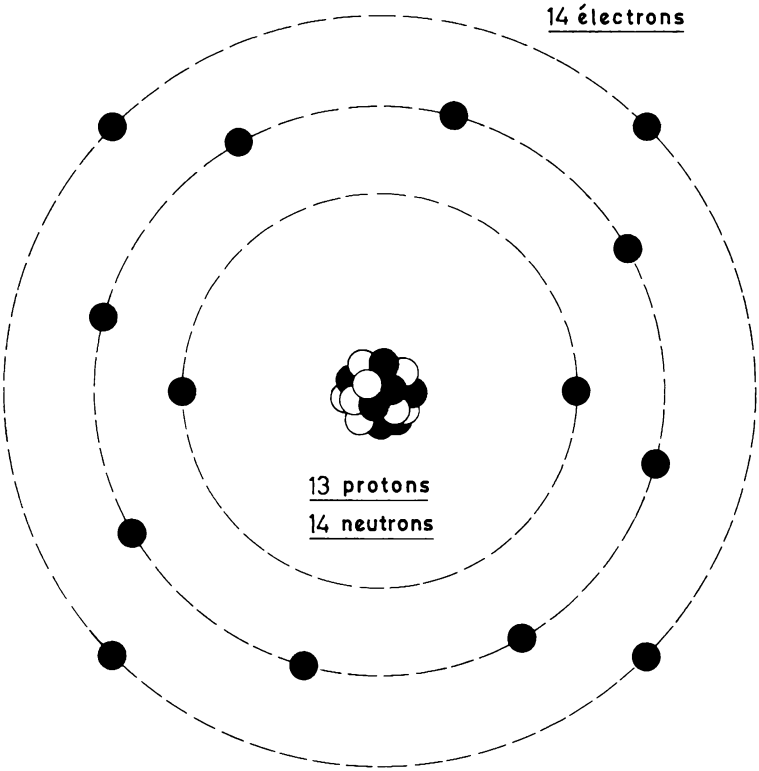


Figure 2 : Ion négatif d'aluminium

Les *neutrons* sont électriquement neutres et de poids sensiblement égal aux protons.
Les électrons, protons et neutrons se nomment *particules élémentaires*, ce sont les constituants de toute matière. Il existe encore d'autres particules élémentaires dont dix sont connues jusqu'à maintenant. Certaines de ces particules élémentaires ont une durée de vie extrêmement courte, tandis que d'autres ont tendance à se transformer. Pour ce qui nous concerne, nous ne nous intéresserons en premier lieu qu'aux constituants de l'atome tels que les protons, neutrons et électrons. Plus tard, nous aurons à nous occuper du *photon*. Le photon est également une particule élémentaire ; il joue un rôle important dans le fonctionnement des cellules photoélectriques et des photodiodes.
La constitution de l'atome repose sur certaines lois. Dans les conditions normales, les atomes sont neutres par rapport à leur entourage. Pour chaque proton dans le noyau, nous trouvons un électron en orbite. Lorsque cet équilibre est perturbé, l'atome devient alors un *ion*. Si l'atome possède un

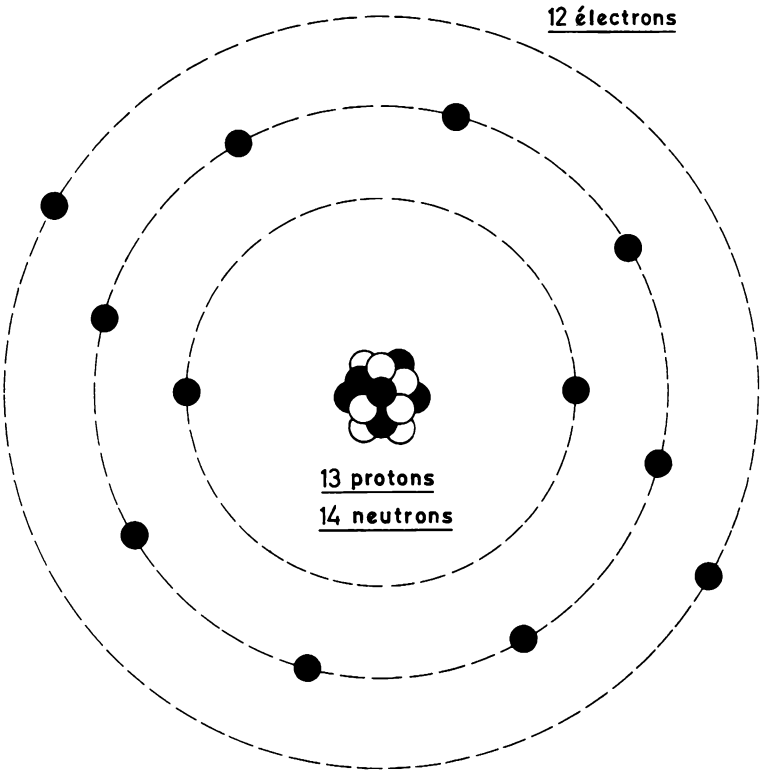


Figure 3 : Ion positif d'aluminium

électron en trop il se présente dès lors chargé négativement par rapport à l'extérieur; un ion négatif s'appelle *anion*. S'il manque en revanche un électron dans l'atome, la charge des protons domine et il en résulte un ion positif. Les ions positifs s'appellent *cations*. La figure 2 montre l'exemple d'un ion négatif d'aluminium et la figure 3 montre, au contaire, un ion positif d'aluminium.

Les ions se rencontrent souvent dans les liquides et nous apprendrons à connaître par la suite leurs applications à l'électrolyse et aux accumulateurs. Sous certaines conditions, les ions apparaissent aussi dans les gaz, car, dans les tubes au néon et dans les lampes à effluves, la conductibilité est pratiquement assurée par les ions.

Les électrons ne sont pas toujours liés à un atome; dans de nombreux matériaux ils se trouvent à l'état libre et se déplacent à l'intérieur de celui-ci. Des particules élémentaires de même charge (de même polarité) se repoussent alors qu'elles s'attirent si elles sont de charges contraires.

Il s'ensuit que les électrons, qui tournent autour du noyau atomique chargé positivement et attirés par lui, devraient finir par y tomber. Mais, en raison de leur masse, les électrons en orbite autour du noyau sont soumis à une force centrifuge. Cette force centrifuge étant alors de même valeur que la force d'attraction électrique entre le noyau de l'atome et l'électron, les deux forces se compensent mutuellement. L'électron poursuit son orbite sans tomber dans le noyau. La composition du noyau de l'atome semble faire mentir les lois de l'attraction puisque dans un volume extrêmement faible on trouve des particules élémentaires positives, les protons. En vertu des forces électriques dues aux charges identiques de même signe des protons, il semble que le noyau atomique devrait littéralement éclater. Or, il n'en est rien car, dans le noyau, des forces bien plus importantes que les forces électriques entrent en jeu. Ce sont ces forces nucléaires qui donnent à la bombe atomique son extraordinaire énergie explosive basée sur le principe de la fission de l'atome.

4. L'essentiel

L'ensemble des matériaux est composé de quelques particules élémentaires. Les particules élémentaires principales sont les électrons légers chargés négativement, les protons lourds chargés positivement et les neutrons, sans charge et de masse sensiblement égale à celle du proton.
Les protons et les neutrons constituent le noyau de l'atome et les électrons tournent autour de ce noyau. Normalement, l'atome est électriquement neutre par rapport à l'extérieur. Les ions sont des atomes dont l'équilibre des charges entre le noyau et ses électrons est perturbé.

5. Exercices de répétition (solutions page 413)

a) Qu'entendez-vous par molécule ?
b) Dessinez la structure d'un atome ayant huit protons et huit neutrons dans son noyau.
c) Qu'entend-t-on par élément chimique ?
d) Combien y a-t-il d'éléments chimiques ?
e) Comment se nomment les trois principales particules élémentaires et quelles sont leurs propriétés ?
f) Dans quelles conditions un atome devient-il un ion ?
g) Quelle est la différence entre les anions et les cations ?
h) Où les ions jouent-ils un rôle en électrotechnique ?
i) Pourquoi les forces de répulsion entre les protons d'un noyau atomique ne provoquent-elles aucune explosion ?
k) Pourquoi les électrons ne sont-ils pas attirés par la charge positive du noyau atomique ?
l) Y a-t-il encore d'autres particules élémentaires que celles, bien connues, qui constituent l'atome ?

II. Electricité

1. Introduction

Plusieurs formes par lesquelles l'électricité se manifeste étaient connues depuis bien des siècles (600 ans av. J.-C.) sans que l'on n'ait pu s'expliquer ces phénomènes. Plus tard, on utilisa les effets de l'électricité, on construisit des appareils électriques sans connaître les causes de leur fonctionnement. Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la nature de l'électricité.

2. Que savez-vous au sujet de l'électricité ?
(solutions page 415)

a) Le cuivre est-il un conducteur électrique ?
b) Quelles sont les propriétés d'un isolant ?
c) Dans un conducteur métallique, quelles sont les particules élémentaires qui sont réellement les porteurs du courant électrique ?
d) Pour qu'un courant électrique puisse s'écouler dans un conducteur, une force motrice doit être disponible. Donnez un exemple qui soit la cause d'un courant électrique.
e) Un courant électrique dans des gaz est-il possible ?
f) Connaissez-vous un exemple d'écoulement d'un courant dans des liquides ?

3. La nature de l'électricité

Dans les corps solides les électrons libres peuvent se mouvoir. Sous l'influence de la température ambiante, les *électrons libres* suivent des trajectoires quelconques dans tous les sens et se déplacent librement dans le réseau cristallin formé par la liaison des atomes. La totalité des électrons libres présents dans un conducteur est souvent désignée par le terme de *gaz électronique*, car il se comporte de façon analogue à un gaz dans un tube. Puisque chaque électron porte sa charge élémentaire, le déplacement d'un électron est équivalent au déplacement d'une charge électrique. Aussi longtemps que ces déplacements ont lieu de façon désordonnée et irrégulière aucun effet ne peut être pratiquement remarqué à l'extérieur du conducteur. Toutefois si les électrons réussissent à se mouvoir régulièrement dans une direction, un courant électrique est réalisé. Un courant électrique ne peut alors circuler que si dans la matière considérée il se trouve un nombre suffisant d'électrons libres. Le nombre d'électrons libres donne une mesure directe de la conductibilité d'une matière. Il définit ainsi la gamme complète allant des très *bons conducteurs* aux *isolants* en passant par les mauvais conducteurs et les *semi-conducteurs*.

Le cuivre est le conducteur le plus utilisé en électrotechnique. L'argent possède encore une meilleure conductibilité (le meilleur de tous les conducteurs). L'aluminium, un peu moins bon conducteur que le cuivre, est employé là où le prix du cuivre joue un rôle important (réseaux de distribution à très haute tension). Des conducteurs argentés sont utilisés là où une conductibilité maximale en surface est nécessaire, particulièrement pour les très hautes fréquences. L'or est aussi employé comme conducteur pour recouvrir des lignes ou des contacts bien que sa résistance soit quelque peu plus élevée que celle de l'argent (comparable à celle de l'aluminium) parce que c'est un métal noble qui ne s'oxyde pas.
La conductibilité électrique est dépendante de la température. La température est une mesure de l'agitation désordonnée des électrons libres ainsi que des atomes modifiés, lesquels effectuent un mouvement oscillant autour de leur position de repos dans le réseau cristallin. Plus la température est élevée, plus l'amplitude de l'oscillation augmente. Plus l'amplitude des oscillations augmente, plus les chocs entre les électrons et les atomes modifiés sont nombreux, ce qui a pour effet de gêner le passage des électrons. Ainsi, une résistance croissant avec la température s'oppose à l'écoulement des charges. Dans les semi-conducteurs – à l'inverse des conducteurs – une température croissante augmente notablement la conductibilité. Sans doute, le matériel semi-conducteur obéit à la même loi d'augmentation de la résistance avec la température. Mais ici, en raison de l'amplitude d'oscillation accrue des atomes, des électrons échappent à leurs orbites de liaison et prennent part ainsi à la conduction du courant: le nombre croissant des électrons libres a pour conséquence que la conductibilité augmente jusqu'à surpasser la diminution de conductibilité due à l'agitation thermique. Les matériaux semi-conducteurs les plus connus sont le germanium et le silicium. Ce sont les matières de base utilisées pour la fabrication des transistors et des diodes semi-conductrices.
Dans aucun conducteur un courant ne peut s'écouler sans la présence d'une cause provoquant ce courant. La cause de l'écoulement d'un courant électrique s'appelle *différence de potentiel*. Nous nous plaçons devant deux sphères de cuivre posées sur un support isolant. Sur l'une de ces sphères nous faisons s'écouler de l'extérieur une grande quantité d'électrons libres. A l'autre sphère, nous amenons une quantité sensiblement plus faible d'électrons. Maintenant, les deux sphères sont chargées électriquement. Dès l'instant où l'une des sphères possède plus d'électrons que l'autre, il s'établit entre elles une différence de potentiel. Puisque les sphères sont montées sur un support isolant, la différence de potentiel se maintient. Si l'on relie maintenant les deux sphères par un conducteur, un flux d'électrons s'écoulera de la sphère qui en a en surplus vers celle qui a une charge plus faible jusqu'à ce que la différence de potentiel disparaisse. Les deux sphères possèdent maintenant la même quantité d'électrons. Dans le conducteur, un courant électrique s'est écoulé pendant la durée d'égalisation des charges. Lorsque, dans un conducteur, les électrons se déplacent dans une direction commune, on parle alors de courant électrique.

Dans la pratique, la différence de potentiel est produite de différentes manières ; la batterie de la lampe de poche, l'accumulateur d'un véhicule, le générateur d'une centrale électrique produisent tous la différence de potentiel qui est nécessaire pour que le courant électrique souhaité puisse s'écouler.
Dans un bon conducteur, l'action du courant électrique se propage à une vitesse voisine de celle de la lumière. En revanche, un électron pris isolément n'avance que très lentement dans le conducteur. Le flux du courant peut se comparer au mieux à un long tuyau rempli de petites billes d'acier. Si je presse sur les billes à l'une des extrémités du tube, la pression se fait aussitôt sentir à l'autre extrémité et les quelques billes qui en tombent n'ont parcouru qu'une toute petite distance dans le tube.
Dans les corps solides, le courant électrique est causé exclusivement par les électrons car là, les ions ont des liaisons solidement établies à leurs points d'attache. Dans les liquides, au contraire, le courant électrique est principalement transporté par les ions ; dans les gaz, les ions et les électrons peuvent être les porteurs du courant. Souvenons-nous de l'exemple des deux sphères de cuivre où nous avons vu se produire une égalisation des charges. Les électrons et les ions sont des porteurs de charges d'égale valeur, tous deux sont des porteurs du courant électrique.

4. L'essentiel

Les électrons libres et les ions sont les porteurs du courant électrique.
Nous établissons une distinction entre les conducteurs, les semi-conducteurs et les non-conducteurs (isolants). Un conducteur contient beaucoup d'électrons libres, le non-conducteur n'en contient aucun, tandis que le semi-conducteur – qui possède une conductibilité médiocre – change ses propriétés conductrices sous l'influence de la température.
Si des électrons ou des ions se meuvent dans une direction commune, il s'écoule alors un courant électrique.
La différence de potentiel est la cause du courant électrique.

5. Exercices de répétition (solutions page 416)

a) Qu'entendez-vous par l'expression « gaz d'électrons » ?
b) Quelle est la différence entre un conducteur et un non-conducteur ?
c) Quelle est l'importance du semi-conducteur en électronique ?
d) Sous quelles conditions un courant électrique peut-il s'écouler ?
e) Nommez les porteurs du courant électrique.
f) En quoi le courant électrique dans les corps solides se différencie-t-il de celui qui circule dans les liquides ?
g) Avec quelle vitesse l'action du courant électrique se propage-t-elle dans un bon conducteur ?
h) Quels appareils sont utilisés pour produire une différence de potentiel électrique ?

III. Le circuit électrique

1. Introduction

Dans tous les appareillages électrotechniques, même dans les appareils les plus simples, nous trouvons des éléments de construction reliés entre eux pour former un circuit électrique. Aucun composant n'est à même de pouvoir travailler à lui seul. La connaissance des phénomènes qui ont lieu dans les circuits électriques et de leurs lois est, par conséquent, une condition fondamentale pour comprendre l'électronique. L'électronique est une spécialité qui exige un engagement de nos possibilités d'imagination, bien des notions sont abstraites et ne peuvent souvent être comprises qu'à l'aide de modèles tirés de la mécanique. Pour étudier le circuit du courant électrique le modèle du circuit hydraulique fermé nous sera d'une aide précieuse. Nous utiliserons ce modèle partout où, par ce moyen, les processus peuvent être représentés de façon visible.

2. Que savez-vous au sujet du circuit électrique ?
(solutions page 416)

a) Qu'est-ce qu'un courant électrique ?
b) Quelles conditions doivent être remplies pour qu'un courant électrique puisse s'écouler ?
c) Quelle est la cause initiale provoquant l'écoulement d'un courant électrique ?
d) Avec quelle unité la tension électrique est-elle mesurée ?
e) Que dit la loi d'Ohm ?
f) Connaissez-vous l'unité de la résistance électrique ?
g) A quel moment un fusible peut-il fondre dans un ménage ?

3. Le circuit électrique et ses caractéristiques

a. Le circuit hydraulique comme modèle pour le circuit électrique

La différence de hauteur entre le barrage et la turbine détermine la pression avec laquelle l'eau agit sur les pales. Le genre de construction de la turbine et la section de la conduite forcée ainsi que la pression déterminent conjointement la quantité d'eau qui s'écoule à travers le système par unité de temps. La pression et la quantité d'eau par unité de temps déterminent ensemble la puissance de la turbine. Plus la pression et la quantité d'eau par unité de temps sont grandes, plus grande sera la puissance de la turbine. Le circuit électrique se comporte de façon analogue. La différence de potentiel qui est la cause du flux du courant correspond à la pression dans le circuit hydraulique. La quantité d'eau par unité de temps qui s'écoule dans la conduite forcée correspond au courant électrique. La résistance de frottement dans la conduite forcée et la résistance de la turbine correspondent à la résistance

des fils de la ligne et à la résistance de l'utilisateur dans le circuit électrique. Le tableau 1 montre l'équivalence entre les unités de mesure du circuit hydraulique et celles du circuit électrique.

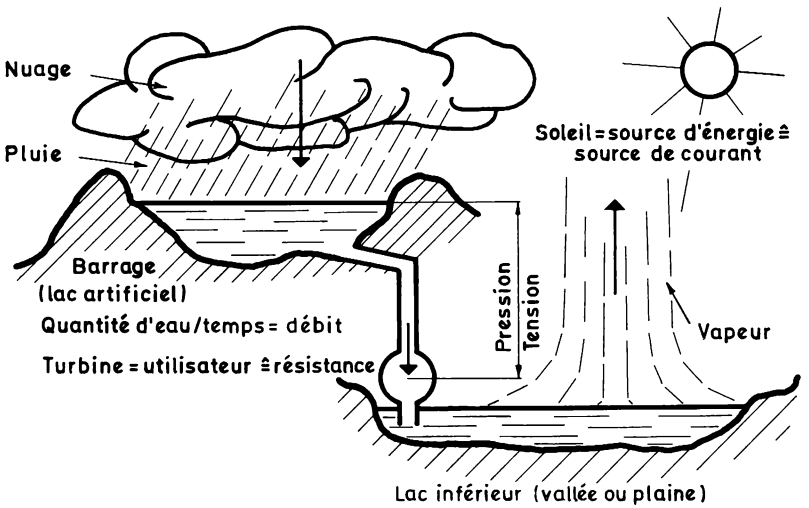


Figure 4 : Cycle de l'eau et ses circuits

Circuit hydraulique			Circuit électrique		
Grandeur	Unité de mesure	Symbole	Grandeur	Unité de mesure	Symbole
Pression	N/m^2 ou N/cm^2	*P*	Tension	Volt V	*U*
Débit	m^3/s		Courant	Ampère A	*I*
Résistance de frottement	N	*F*	Résistance	Ohm Ω	*R*
Puissance	W	*P*	Puissance	Watt W	*P*
Travail	J	*W*	Travail	Wattseconde Ws	*W*

Tableau 1

b. Les unités de mesure

Le tableau 1 nous montre les différentes unités de mesure. Il existe différents systèmes d'unités de mesure. En électrotechnique le *système basé* sur les *quatre unités* fondamentales mètre, kilogramme, seconde et ampère (MKSA) a fait ses preuves. Toutes les grandeurs électriques peuvent se définir avec ces unités fondamentales. Bien d'autres unités ont été utilisées dans le passé : elles se rencontrent encore souvent dans les livres spécialisés et les descriptions d'appareils. Nous nous en tiendrons aux quatre unités fondamentales et nous ne citerons fortuitement les anciennes unités de mesure que pour permettre l'étude d'anciens documents.
Le système de mesures qui nous intéresse en électrotechnique, basé sur les quatre unités fondamentales mètre, kilogramme, seconde et ampère, s'appelle **Système Giorgi.**

c. La tension électrique

Dans notre modèle nous avons comparé la *tension électrique* avec la pression. Dans un circuit électrique la tension provoque la circulation du courant. La différence de potentiel est créée par la source de tension. Dans cette dernière, les électrons se déplacent du pôle positif vers le pôle négatif. Les sources de tension les plus connues sont : les piles sèches (ou batteries), les accumulateurs et les générateurs. Les sources de tension continue sont polarisées, elles présentent un pôle négatif et un pôle positif (− ou +). Au pôle négatif règne un surplus d'électrons, au pôle positif un manque.
L'unité de mesure de la tension est le *volt*, son abréviation est : V. Dans les formules mathématiques le symbole est : *U* (symbole principal).

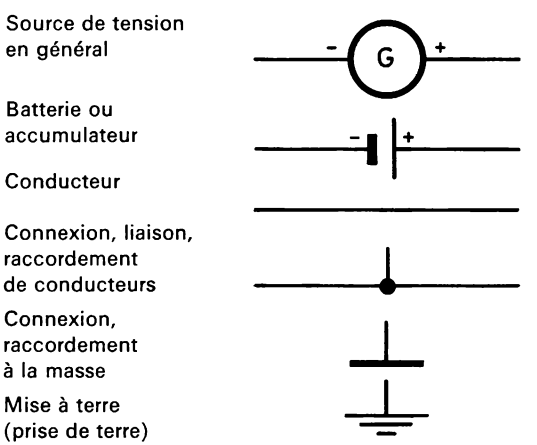


Figure 5 :
Symboles graphiques

Les valeurs de tensions dans les circuits sont très différentes selon le genre d'installation. Dans certains circuits des tensions apparaissent qui nécessitent des unités plus grandes que le volt pour en indiquer la valeur. Par contre, dans d'autres circuits, les tensions qui s'y manifestent doivent être données par des unités plus petites que le volt. Cette nécessité s'applique à la plupart des unités de l'électrotechnique. Pour simplifier l'écriture, on a, par conséquent introduit les abréviations suivantes :

1 millionième de millionième	= 1 pico	= 1 p	$= 10^{-12}$
1 milliardième	= 1 nano	= 1 n	$= 10^{-9}$
1 millionième	= 1 micro	= 1 μ	$= 10^{-6}$
1 millième	= 1 milli	= 1 m	$= 10^{-3}$
mille	= 1 kilo	= 1 k	$= 10^{+3}$
1 million	= 1 méga	= 1 M	$= 10^{+6}$
1 milliard	= 1 giga	= 1 G	$= 10^{+9}$

Reportés sur l'unité de tension nous obtenons les exemples suivants :

1 millionième de volt	= 1 microvolt	= 1 μV
1 millième de volt	= 1 millivolt	= 1 mV
mille volts	= 1 kilovolt	= 1 kV
1 million de volts	= 1 mégavolt	= 1 MV

Le tableau 2 montre quelques exemples de tensions tels qu'ils se présentent en pratique

Source de tension	Valeur de la tension
Antenne de réception	0,5 à 500 μV
Microphone	1 à 100 mV
Lecteur de disques, pick-up	20 à 400 mV
Batteries de lampes de poche	1,5 à 6 V
Accumulateur d'automobile	6 à 24 V
Installations de téléphone	48 V
Réseau lumière	220 V
Réseau force	380 V
Lignes à haute tension	150 à 380 kV
Tensions pour les tubes image en télévision	16 kV à 25 kV
Installations de laboratoires	plusieurs MV

Tableau 2

Les tensions électriques peuvent être mortelles !

La limite des tensions, considérées comme mortelles, est plus ou moins élevée selon les lois des divers pays. La tension électrique que l'être humain peut supporter sans danger dépend principalement de sa constitution et de l'humidité de son épiderme. Dans des conditions défavorables, une tension au-dessous de 100 V, peut déjà être mortelle. *Au cours d'expérimentations avec des sources de tension, la plus grande prudence est donc toujours de rigueur.*

d. Le courant électrique

Le *courant électrique* correspondait, dans notre modèle, à la quantité d'eau débitée par unité de temps. Dans le circuit électrique on peut évaluer l'intensité du courant en mesurant la quantité d'électrons écoulés, dans le conducteur, pendant un temps déterminé. La quantité d'électrons correspond au débit de l'eau dans le circuit hydraulique.
L'unité de mesure du courant électrique est l'*ampère*; son abréviation, ou symbole, est: A.
Pour désigner le courant, dans les formules, on emploie la lettre I (= intensité). Dans le circuit alimenté par une source de tension continue, les électrons se déplacent du pôle négatif vers le pôle positif de la source. Avant que toute la clarté ne fut faite sur la nature du courant électrique une convention fixa le sens de son écoulement (dit: sens conventionnel). A cette époque on se mit d'accord avec la règle suivante:
Dans un circuit à courant continu, le courant s'écoule du pôle positif au pôle négatif à l'extérieur de la source de tension.
Nous savons maintenant que cette supposition était fausse. Malgré cela on s'en tient toujours à cette règle car le sens du champ magnétique, dans les électroaimants, les moteurs et les générateurs est déterminé d'après ce *sens conventionnel du courant.*
Lorsque nous examinons un circuit nous utilisons le sens conventionnel du courant alors que si nous devons nous occuper de processus physiques en relation avec des composants tels que des tubes électroniques nous devons, alors, utiliser le sens du courant des électrons. Les mêmes abréviations que celles utilisées pour la tension sont employées pour le courant. Le tableau 3 montre quelques exemples de courants tels qu'ils se présentent en pratique.

Installation	Valeur du courant
Antenne de réception	0,01 à 1 μA
Microphone	0,01 à 100 mA
Lampe à incandescence d'une lampe de poche	100 à 500 mA
Transistors	0,1 mA à 10 A
Appareils de ménage	1 à 15 A
Démarreur d'automobile	50 à 100 A
Centrale électrique	jusqu'à 50 kA
Fours électriques	jusqu'à 100 kA

Tableau 3

e. La résistance électrique

La *résistance électrique* correspond, en hydraulique, à la résistance de la conduite forcée et à celle de la turbine. L'eau est freinée par les parois de la conduite et les pales de la turbine provoquent un freinage supplémentaire du débit de l'eau.

Le courant électrique se comporte de façon analogue. Dans le conducteur, les électrons sont freinés par les atomes immobiles et les ions et dans l'utilisateur – une lampe à incandescence par exemple – leur passage est à nouveau rendu difficile. La somme de la résistance de la ligne et de la résistance de l'utilisateur donne la résistance totale du circuit. La résistance dépend du genre de conducteur et de la grandeur de l'utilisateur. Une conduite de faible section oppose à l'eau une plus grande résistance que celle opposée par une conduite de grande section. Une turbine ayant une petite ouverture de passage provoque une plus grande résistance que celle, d'un autre modèle, présentant une grande ouverture de passage.
L'unité de mesure de la résistance électrique est l'*ohm*, son abréviation est la lettre grecque Ω « oméga ».
Dans les formules, la lettre R est employée comme symbole.
Symbole graphique de la résistance :

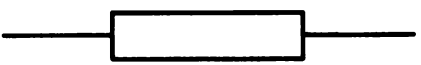


Figure 6 : Symbole de la résistance

Il arrive souvent que, au lieu de la résistance, on emploie la *conductance*. Sous le terme de conductance d'une résistance il faut entendre sa valeur réciproque ($G = \frac{1}{R}$).
L'unité de mesure de la conductance est le siemens dont l'abréviation est S. Dans les formules, la lettre G est employée comme symbole de la conductance.

f. La loi d'Ohm

La loi d'Ohm définit l'interdépendance entre le courant, la tension et la résistance dans le circuit électrique.
Si la pression augmente dans le circuit hydraulique alors le débit augmente. Si, en maintenant la pression constante, on augmente la section de la conduite et l'ouverture de passage de la turbine le débit augmente également. Le circuit électrique se comporte exactement de la même façon.
Si, pour une résistance de la ligne et de l'utilisateur donnés, la tension est augmentée, un courant plus fort s'écoulera dans le circuit. Par contre, si en maintenant la tension inchangée, on diminue la résistance, le courant augmente de nouveau.
La figure 7 montre un circuit fermé, composé d'une source de tension et d'un utilisateur. En parallèle sur la source de tension se trouve un instrument de mesure qui indique la valeur de la tension. Un autre instrument de mesure, inséré dans le circuit, indique la valeur du courant.

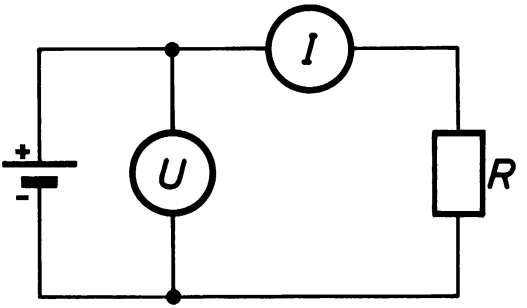


Figure 7 : Circuit électrique fermé

La loi qui régit le circuit électrique s'appelle : loi d'Ohm, sa formule est la suivante :

$$U = R \cdot I$$

g. La puissance électrique

La puissance de la turbine hydraulique dépend de la pression de l'eau et de la quantité d'eau qui s'écoule à travers elle, par unité de temps. La puissance fournie par la turbine augmente proportionnellement avec la pression de l'eau et avec la quantité débitée par unité de temps. Dans le circuit électrique la puissance se comporte de façon analogue. La puissance électrique est transformée en chaleur dans la résistance. Plus le courant et la tension sont grands, plus la *puissance* est grande et la résistance s'échauffe d'autant plus. La puissance électrique est proportionnelle à la tension appliquée et au courant qui s'écoule.
L'unité de la puissance électrique est le *watt*, son abréviation (ou symbole) est : W
Dans les formules la lettre *P* est utilisée pour désigner la puissance.
La formule de la puissance du circuit à courant continu s'énonce ainsi :

$$P = U \cdot I$$

P = Puissance en watt(s)
U = Tension en volt(s)
I = Courant en ampère(s)

Les mêmes abréviations que celles utilisées pour les unités de tension et de courant, s'emploient pour les unités de puissance.
Le tableau 4 nous montre quelques exemples se rapportant à la grandeur des puissances tels qu'ils se présentent dans la pratique.

Installation	Valeur de la puissance
Antennes de réception	Fractions de mW
Ecouteur	Quelques mW
Lampes à incandescence	quelques W à 1 kW
Poêles électriques portables	1 à 2 kW
Locomotives	plusieurs centaines de kW
Fours de fusion	quelques MW
Centrales nucléaires	Mühleberg : 400 MW

Tableau 4

h. Le travail électrique

Lorsque la turbine a fourni une puissance pendant un certain temps elle a alors produit un travail déterminé. Le travail est le produit de la puissance par le temps. Si un poêle électrique est mis en service pendant un temps déterminé il prélève un travail sur le réseau. Nous devons payer ce travail à l'entreprise électrique qui le fournit : nous payons des kilowattheures (kWh). Un kilowattheure est consommé lorsque, par exemple, un poêle d'une puissance de 2 kilowatts est enclenché pendant 30 minutes.
L'unité de travail électrique est le *wattseconde* et son abréviation est : Ws
Dans les formules la lettre *W* est employée pour désigner le travail.
Les unités utilisées pour mesurer le travail électrique sont le wattheure (Wh) et le kilowattheure (kWh).
L'unité de travail, que l'on rencontre souvent dans les livres de physique, est le *joule* (J) qui correspond à 1 wattseconde (Ws).
La formule du travail est la suivante :

$W = P \cdot t$

W = Travail en wattsecondes ou en wattheures
P = Puissance en watts
t = Temps en secondes ou en heures

4. Exemples

a. Calcul de la résistance

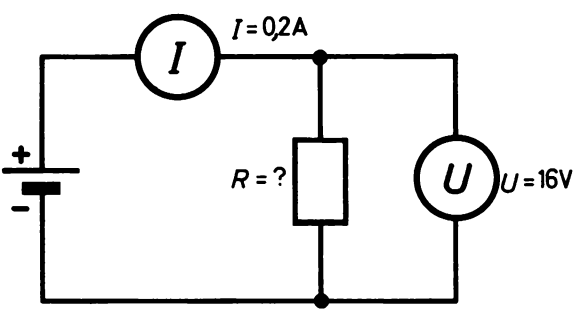


Figure 8

La figure 8 montre un circuit électrique. L'ampèremètre mesure le courant et le voltmètre la tension. Chercher la valeur de la résistance.

Solution:

– écrire la formule de base $U = R \cdot I$

– tirer R de la formule $R = \dfrac{U}{I}$

– introduire les valeurs et calculer $R = \dfrac{16\ \text{V}}{0{,}2\ \text{A}}$

$R = \mathbf{80}\Omega$

Nous utiliserons ce mode de faire pour résoudre tous les problèmes. Dès que la formule de résolution devient quelque peu compliquée on perd facilement la vue d'ensemble. Il est, par conséquent, judicieux de séparer les nombres des unités de mesure. Ce processus a de plus le grand avantage de reconnaître une erreur dans la disposition de la formule quand la preuve, concernant les unités, ne joue pas.
Nous avons appris que l'électrotechnique est basée sur les quatre unités fondamentales mètre, kilogramme, seconde et ampère. En vue de simplification le volt est introduit en électrotechnique: $V = m^2 kgs^{-3} A^{-1}$; (1 VAs = 1 Ws = 1 $kgm^2 s^{-2}$). L'exemple ci-dessus nous montre que l'unité « ohm » n'est autre que le quotient des volts par les ampères, par conséquent avec l'ohm nous n'avons introduit aucune nouvelle unité.

b. Calcul du courant

La figure 9 nous montre une résistance comme utilisateur. Il faut déterminer le courant.

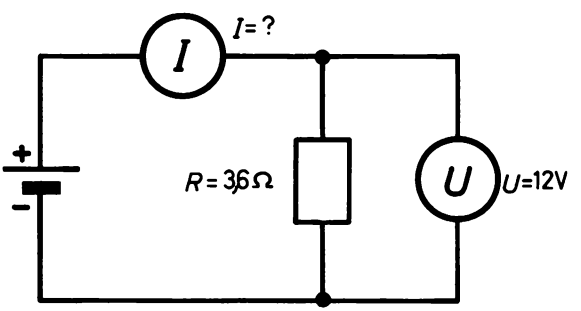


Figure 9

Solution:

– écrire la formule de base $U = R \cdot I$

– tirer I de la formule $I = \frac{U}{R}$

– introduire les valeurs et calculer $I = \frac{12\ \text{V} \cdot \text{A}}{3{,}6\ \text{V}}$

$I = \mathbf{3{,}33\ A}$

c. Calcul de la tension

Il faut déterminer la tension dans le cas de la figure 10.

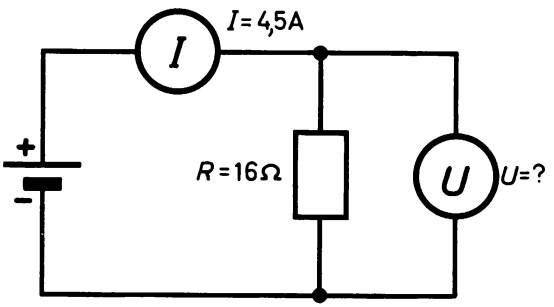


Figure 10

Solution:

– écrire la formule de base $U = R \cdot I$

– introduire les valeurs et calculer $U = 16 \cdot 4{,}5 \frac{\text{V} \cdot \text{A}}{\text{A}}$

$U = \mathbf{72\ V}$

d. Calcul de la puissance et du travail

La figure 11 nous montre une résistance soumise à une tension de 12 V. Elle reste enclenchée pendant 20 min. Calculer la puissance dans la résistance et le travail fourni.

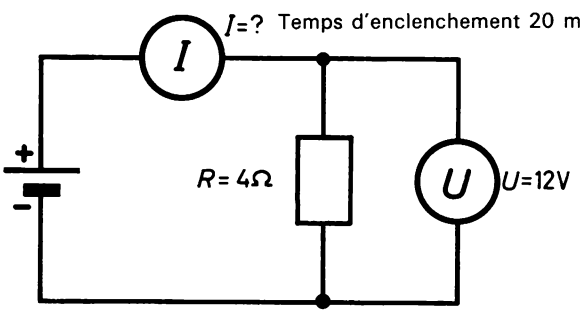


Figure 11

Solution: (pour le calcul de la puissance)

– écrire la formule de base $P = U \cdot I$

– écrire la formule de base de la loi d'Ohm $U = R \cdot I$

– tirer I de la formule $I = \frac{U}{R}$

– introduire cette équation dans la première formule de base $P = \frac{U^2}{R} \left(P = U \cdot \frac{U}{R}\right)$

$$[P] = \mathrm{V} \cdot \mathrm{V} \cdot \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{V}} = \mathrm{V} \cdot \mathrm{A} = \mathrm{W}$$

– introduire les valeurs et calculer $P = \frac{12 \cdot 12}{4}$

$$P = \mathbf{36\ W}$$

L'unité de puissance, volt fois ampère, s'exprime en watt.

Solution: (pour le calcul du travail)

– écrire la formule de base $W = P \cdot t$

– introduire les valeurs et calculer $W = 36 \cdot \frac{1}{3} \mathrm{W} \cdot \mathrm{h}$

$$W = \mathbf{12\ Wh}$$

Le calcul est simplifié lorsque nous employons les heures à la place des secondes.

5. L'essentiel

En ce qui concerne l'électrotechnique, quatre unités suffisent: le mètre, la seconde, le volt et l'ampère.

Dans un circuit à courant continu cinq notions y jouent un rôle:

– La *tension* est la cause du courant, elle se mesure en volts et peut être comparée à la pression dans un circuit hydraulique.

– Le *courant* correspond à l'écoulement d'une quantité déterminée de porteurs de charge par unité de temps. Il se mesure en ampères et peut être comparé au débit d'une quantité d'eau par unité de temps dans un circuit hydraulique.

– La *résistance* oppose un obstacle à l'écoulement du courant, elle se mesure en ohms. Elle peut se comparer à la résistance due au frottement dans une conduite d'eau. Sa valeur inverse s'appelle la *conductance* qui se mesure en siemens.

– La *puissance* est le résultat du produit de la tension par le courant, son unité de mesure est le watt. Un watt correspond à un volt multiplié par un ampère.

– Le *travail* est le résultat du produit de la puissance par le temps, il se mesure en wattsecondes.

La *loi d'Ohm* régit l'interdépendance entre la tension, le courant et la résistance dans le circuit électrique. La formule de base s'exprime par : $U = R \cdot I$

6. Exercices de répétition (solutions page 417)

a) Nommez les quatre unités du système Giorgi nécessaires en électrotechnique.
b) Dressez un tableau de toutes les abréviations désignant les tensions et les courants faibles et forts.
c) Qu'entendez-vous par le terme « conductance » ?
d) Quelle est l'unité de mesure de la puissance électrique ?
e) Indiquez les unités de mesure de la tension, du courant et de la résistance puis nommez les termes équivalents se rapportant au modèle du circuit hydraulique.
f) D'après la figure 12, calculez la tension aux bornes de la résistance R, la puissance dissipée, le travail fourni pendant 25 minutes par la source de tension et la conductance de la résistance.

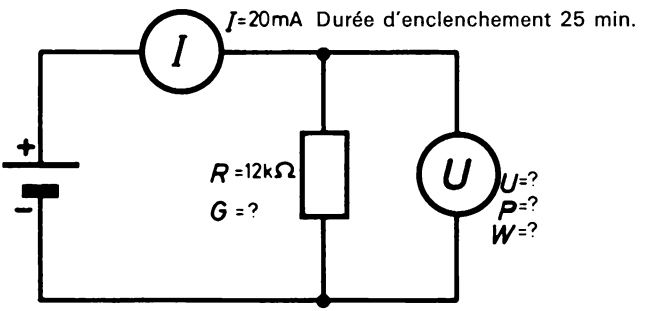


Figure 12

g) D'après le schéma de la figure 13 calculez la puissance utilisée dans les résistances R_1 et R_2. Quelles sont les valeurs des courants I_2 et I_3 ? Nous posons comme condition préalable que la résistance interne des ampèremètres est négligeable.

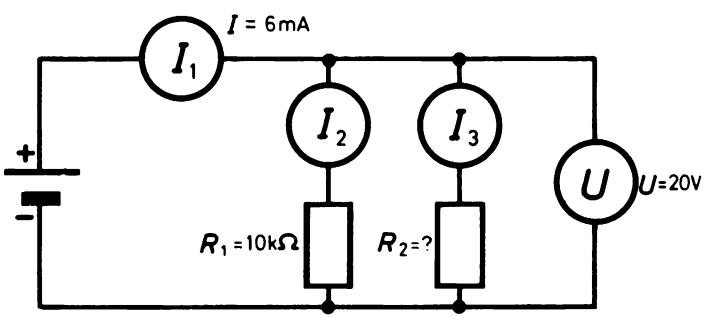


Figure 13

h) D'après la figure 14, calculez les valeurs suivantes :
- Tension de la batterie U_b.
- Valeurs des résistances R_1, R_2 et R_4.
- Valeur de la tension U_4.
- Valeur de la puissance dissipée dans les résistances R_1, R_2, R_3 et R_4.
- Valeur du courant dans I_3.

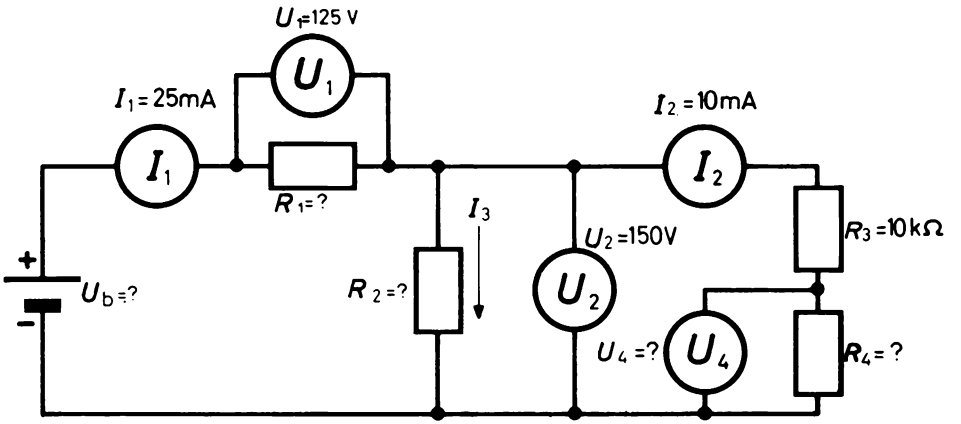


Figure 14

B. Sources de tension électrochimiques

I. Eléments galvaniques

1. Introduction

L'élément galvanique, nommé aussi élément primaire, se trouve le plus souvent sous la forme de pile sèche (ou batterie sèche) dans le commerce. Grâce aux processus chimiques qui se passent dans l'élément galvanique des électrons sont libérés, ce qui permet d'en faire une source de courant. Les éléments primaires jouent un grand rôle dans la technique de la radio car, de nos jours, la plupart des petits appareils de radio (émetteurs-récepteurs) sont alimentés par des batteries de piles sèches.

2. Que savez-vous au sujet des éléments galvaniques ? (solutions page 421)

a) Décrivez la construction d'un élément galvanique.
b) Quelle est la tension de service de la cellule d'une batterie que l'on trouve ordinairement dans le commerce et qui est composée d'éléments galvaniques ?
c) Qu'entendez-vous par le terme de « Force électromotrice » ?
d) Qu'est-ce qu'un ion ?
e) Vers quelle électrode s'écoule le cation lorsque deux électrodes, plongées dans un liquide conducteur, sont reliées à une tension continue ?

3. L'élément galvanique

a. L'action chimique du courant électrique

Quelques liquides et parmi eux l'eau distillée sont non-conducteurs. Si l'on dissout du sel de cuisine dans de l'eau distillée, ou que l'on y verse un peu d'acide, l'eau devient conductrice. Des liquides conducteurs s'appellent *électrolytes*. Les porteurs du courant sont les ions. Dans un électrolyte les ions se dissocient, il se forme des anions et des cations. Si l'on emploie par exemple comme électrolyte une solution diluée d'acide sulfurique il se forme des ions positifs d'hydrogène alors que les molécules, composées de soufre et d'oxygène, présentent une charge négative. Sous l'influence de la tension continue appliquée aux électrodes les cations positifs se déplacent vers la *cathode* tandis que les anions négatifs sont attirés vers l'*anode*.
La figure 15 nous montre ce processus. L'électrode reliée au pôle négatif de la source de tension se nomme cathode et l'électrode positive s'appelle anode.

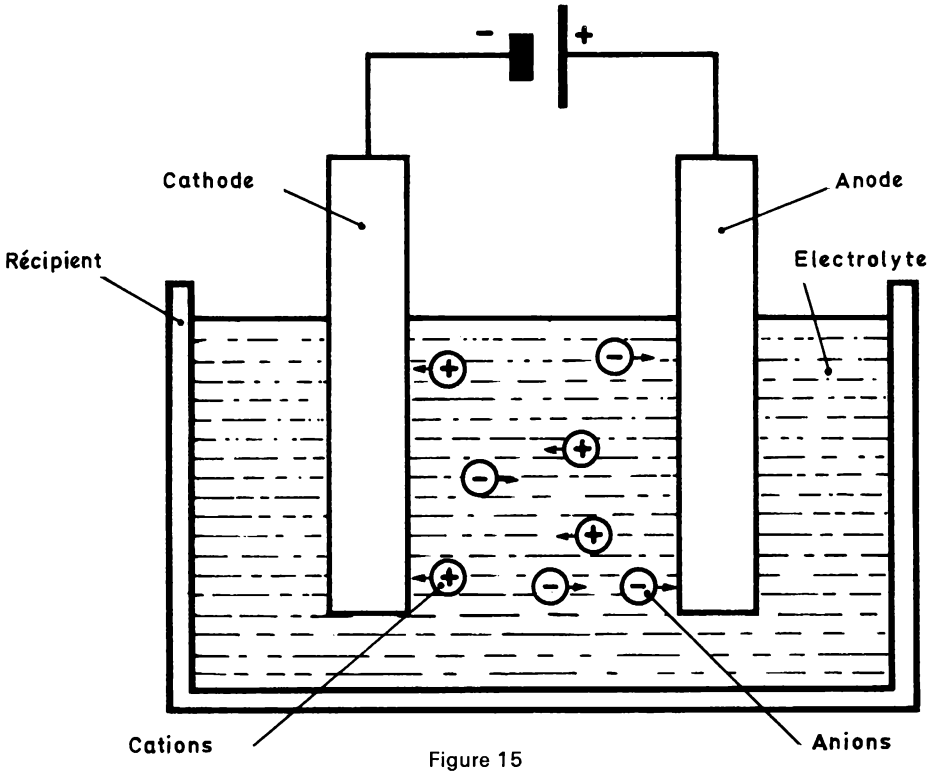


Figure 15

Dès que l'ion atteint l'électrode vers laquelle il est attiré un échange de charges s'effectue. Un anion cède ses électrons supplémentaires à l'anode tandis que le cation, qui a un manque d'électrons, en prélève sur la cathode. Les électrons cédés à l'anode se déplacent vers la cathode, à travers la source de tension, et neutralisent les cations qui arrivent sur la cathode. Dès que l'ion est neutralisé sur l'électrode, il n'est plus influencé par l'effet de la tension électrique car, dès cet instant, son comportement est neutre par rapport à l'extérieur. Ainsi on peut séparer les ions provenant d'un gaz atomique ou de molécules gazeuses d'avec ceux provenant de molécules métalliques, ces derniers se déposent sur l'électrode et y forment ainsi un dépôt métallique. Pendant chaque processus électrolytique, des particules matérielles sont transportées et souvent la matière est dissociée par les électrons.

Le processus décrit est utilisé en galvanotechnique (galvanoplastie) pour la production de pièces recouvertes d'un métal (cuivre, argent, or, etc.). Les processus de base qui ont lieu dans les électrolytes nous permettent de comprendre le fonctionnement d'un élément primaire et des accumulateurs.

b. L'élément primaire

Dans les éléments galvaniques une énergie électrique est produite à l'aide de processus chimiques dans l'électrolyte. La figure 16 nous montre le principe de fabrication d'un élément primaire (pile Leclanché).

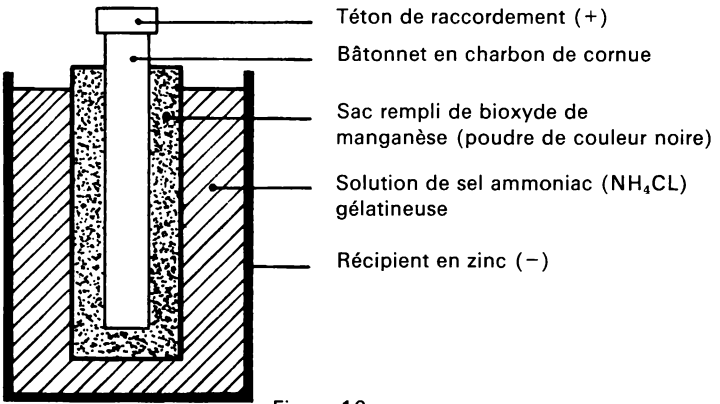


Figure 16

Les électrodes se composent d'un bâtonnet en charbon et d'un récipient en zinc. L'électrolyte est une solution de sel ammoniac rendue gélatineuse à l'aide d'une poudre. Autour du charbon on place un dépolarisant dans un sac : le bioxyde de manganèse.
Lors du processus chimique, qui se déroule dans l'élément Leclanché, des électrons sont libérés. Dans la solution de sel ammoniac, le sel se dissocie en anions et en cations. Les cations se lient à l'électrode de zinc et la corrodent (la « rongent »). Des électrons sont libérés et l'électrode de zinc devient le pôle négatif de l'élément. Les anions se fixent sur le charbon, se neutralisent et dégagent de l'hydrogène. Cet hydrogène, en se déposant sur le charbon finirait par l'isoler complètement et la capacité de la batterie baisserait. Le bioxyde de manganèse MnO2 réduit l'hydrogène, donne de l'ammoniac et empêche ainsi le dégagement de gaz. Le processus chimique entre en action dès que les deux électrodes de l'élément sont reliées à un utilisateur.

c. Le comportement en fonctionnement des éléments galvaniques

En ce qui concerne les éléments galvaniques nous distinguons la *tension à vide* d'avec la tension en charge. Le terme de tension à vide désigne la tension aux bornes de l'élément lorsque celui-ci n'est pas chargé. Cette tension se nomme également « *Force électromotrice* » (FEM). Dès que l'élément est relié à une résistance de charge la *tension aux bornes* diminue.

La cause de ce phénomène a son origine dans la *résistance interne* de l'élément. Pour chaque source de tension nous pouvons dessiner son circuit équivalent. Ce circuit se compose d'une source de tension idéale reliée à une résistance en série représentant la résistance interne.
La figure 17 nous montre ce circuit équivalent.

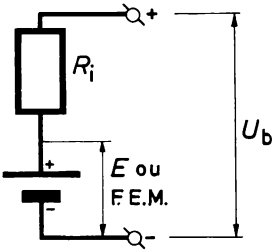


Figure 17 : Circuit équivalent d'une source de tension

Dans le circuit équivalent l'élément produit la F.E.M. ; si la source de tension est chargée (par une résistance externe) alors un courant s'écoule aussi à travers la résistance interne. La chute de tension, qui a lieu dans la résistance interne, est perdue pour l'utilisateur. La tension aux bornes correspond à la F.E.M. diminuée de la chute de tension dans la résistance interne. Cette interdépendance peut être exprimée par une équation algébrique :

$$U_b = E - I \cdot R_i$$

U_b = Tension aux bornes
I = Courant de charge
R_i = Résistance interne

La F.E.M. de l'élément zinc-charbon-sel ammoniac (pile Leclanché) atteint 1,6 V ; en service, la tension aux bornes (moyenne) est de 1,5 V. Selon la grandeur de l'élément la résistance interne va de quelques fractions d'ohm à quelques ohms.

4. Exemples

a. Calcul de la tension

Déterminer la tension aux bornes selon le schéma de la figure 18.

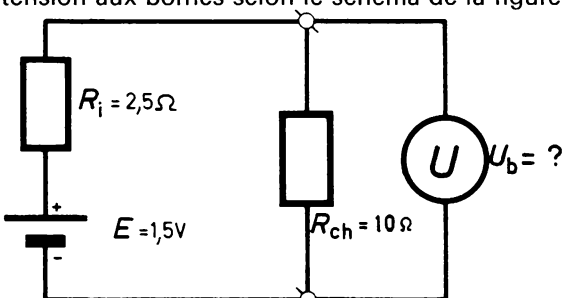


Figure 18

Marche à suivre:

- écrire la formule de base — $U_b = E - I \cdot R_i$
- extraire I de l'équation — $I = \dfrac{E}{R_i + R_{ch}}$
- introduire l'équation de I dans la formule de base et simplifier — $U_b = E\ (1 - \dfrac{R_i}{R_i + R_{ch}})$
- introduire les valeurs et calculer — $U_b = 1{,}5\ (1 - \dfrac{2{,}5}{2{,}5 + 10})$

$U_b = \mathbf{1{,}2\ V}$

b. Calcul de la F.E.M.

Calculer la F.E.M. selon le schéma de la figure 19.

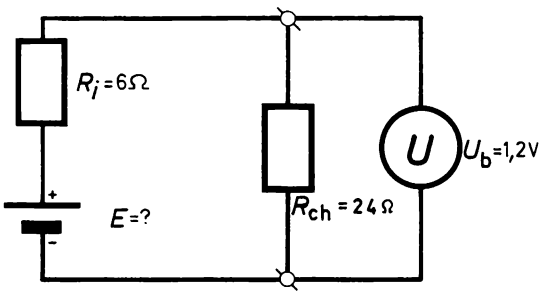


Figure 19

Marche à suivre:

- écrire la formule — $U_b = E - I \cdot R_i$
- transformer la formule de base d'après E — $E = U_b + I \cdot R_i$
- écrire l'équation qui détermine I — $I = \dfrac{U_b}{R_{ch}}$
- introduire la formule de I dans la formule de base et simplifier — $E = U_b\ (1 + \dfrac{R_i}{R_{ch}})$
- introduire les valeurs et calculer — $E = 1{,}2\ (1 + \dfrac{6}{24})$

$E = \mathbf{1{,}5\ V}$

5. L'essentiel

Dans les éléments primaires (piles) un processus chimique est mis à profit pour produire une tension électrique. L'élément galvanique le plus employé se compose d'une électrode de zinc, d'une autre en charbon et d'une solution de sel ammoniac, sous forme de gelée, comme électrolyte. Chaque source de tension peut être représentée par un circuit équivalent qui comporte une source de tension pure, avec sa F.E.M. et la résistance intérieure. Lorsque l'élément est chargé, il se produit une chute de tension due au courant de charge à travers la résistance interne. La tension aux bornes est plus petite que la force électromotrice de la valeur de cette chute de tension.

6. Exercices de répétition (solutions page 422)

a) Qu'est-ce qu'un électrolyte ?
b) Quelle différence y a-t-il entre la conduction du courant dans un conducteur métallique et dans un électrolyte ?
c) Nommez les matériaux des deux électrodes de l'élément primaire le plus employé ?
d) Quelle est l'électrode qui présente le pôle positif ?
e) Définissez l'expression « Force électromotrice » ?
f) Lorsqu'un élément est chargé pourquoi sa tension aux bornes est-elle plus faible que sa F.E.M. ?
g) La tension aux bornes d'un élément dépend-elle de la grandeur de la charge ?
h) D'après la figure 20, déterminez la résistance interne de l'élément. Vous mesurez une tension à vide de 1,5 V avec un voltmètre ayant une très grande résistance interne. Dès que l'élément est relié à une résistance de charge de 10 ohms un courant de 0,1 A s'écoule.

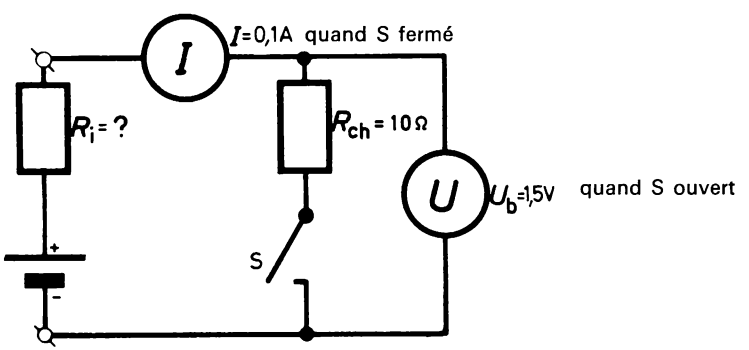


Figure 20

i) Selon la figure 21, chargez un élément avec deux résistances différentes et mesurez simultanément les courants de charge. Quelle est la valeur de la résistance interne de l'élément ?

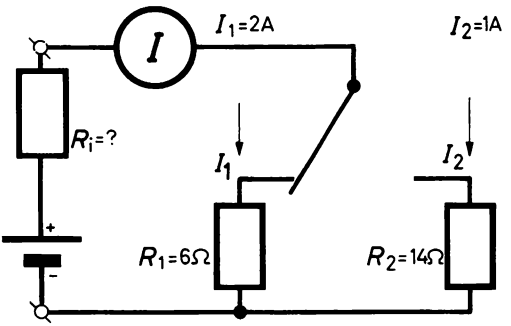


Figure 21

II. Accumulateurs

1. Introduction

L'accumulateur, également nommé élément secondaire, joue un grand rôle en électrotechnique et en technique automobile. Dans les véhicules à moteur, nous trouvons l'accumulateur au plomb qui est la source de tension de bord pour le démarreur, l'éclairage et l'alimentation de courant. L'accumulateur au fer-nickel équipe les appareils de radio portables, les petits émetteurs-récepteurs, les rasoirs électriques et les flash électroniques. Ces accumulateurs ne nécessitent aucune surveillance. Dans l'accumulateur les transformations chimiques sont réversibles; un accumulateur peut, pratiquement, être chargé et déchargé à volonté. Dans ce chapitre nous ne nous occuperons que du principe de base du fonctionnement des accumulateurs. La durée de vie des accumulateurs dépend principalement de la manière dont ils sont traités. Par conséquent prenez garde, lors de leur emploi, aux prescriptions de surveillance et d'utilisation qui sont très variables selon leur fabrication et leurs applications. Les accumulateurs au plomb et au fer-nickel (en allemand: Stahl-Akku) ont des caractéristiques très différentes et requièrent principalement une autre surveillance!

2. Que savez-vous au sujet des accumulateurs?
(solutions page 424)

a) Décrivez la construction d'un accumulateur au plomb.
b) Dans un accumulateur au plomb, la densité de l'acide est-elle une mesure de l'état de charge des cellules?
c) Quelle est la valeur moyenne de la F.E.M. d'une cellule d'un accumulateur au plomb?
d) Que signifie pour vous le terme « Ampère-heure »?
e) Les cellules séparées d'un accumulateur peuvent-elles être reliées en série?

3. Les accumulateurs

a. Constitution de l'accumulateur au plomb

La figure 22 montre le principe d'un accumulateur au plomb. Avant la charge les deux électrodes se composent de sulfate de plomb. L'électrolyte utilisé est de l'acide sulfurique dilué.
Dans cet état l'accumulateur ne présente aucune F.E.M. Pour le charger, une tension continue est appliquée à la cellule. Pendant la charge les deux plaques de sulfate de plomb se transforment. Sur la plaque positive il se forme du bioxyde de plomb tandis que la plaque négative se transforme en plomb pur. La réaction chimique provoque la formation d'acide sulfurique, ce qui a pour conséquence une augmentation de la concentration de ce dernier. Lors de la décharge, le processus chimique s'inverse, sur les électrodes du sulfate de plomb se forme de nouveau et de l'eau réapparaît, ce qui provoque une diminution de la concentration de l'acide.

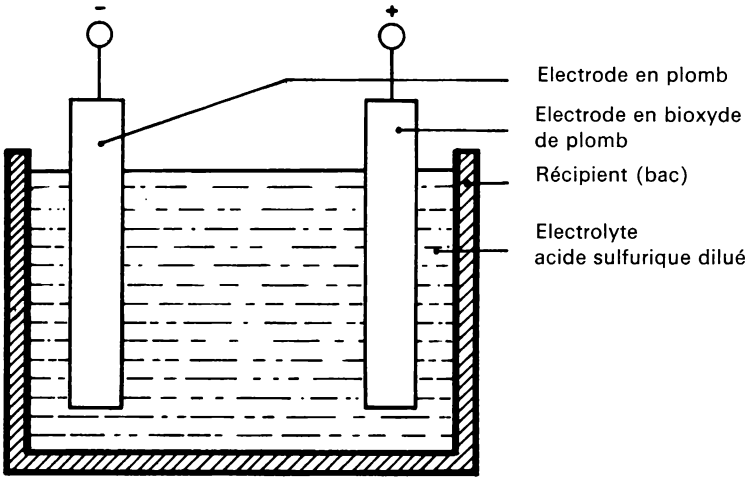


Figure 22 : Constitution d'un accumulateur au plomb

b. Le comportement en fonctionnement d'un accumulateur au plomb

La F.E.M. d'une cellule d'accumulateur au plomb est de 2 V en moyenne. La résistance interne, qui dépend de la grandeur des électrodes, est très petite, elle est de l'ordre de 0,01 à 0,0001 ohm. Cet accumulateur peut, par conséquent, fournir des courants très élevés. La *capacité* d'un accumulateur se mesure en *ampèreheure*. L'abréviation pour l'ampèreheure est Ah. Cette capacité dépend du courant de décharge : plus il est faible plus grande est la capacité. La capacité est, par conséquent, toujours donnée pour un temps de décharge déterminé.

Puisque, dans l'accumulateur, une énergie électrique peut être emmagasinée au moyen de processus chimiques réversibles, il est naturel que le *rendement* de cet appareil nous intéresse. On fait une différence entre le *rendement en ampèreheures* et le *rendement en wattheures*. Dans le premier cas, on établit le rapport entre le nombre d'ampèreheures de la décharge et celui de la charge. Là, toutefois, la tension de charge – pendant la charge – et la tension de décharge – pendant la décharge – n'étant pas constante, le rendement en ampèreheures n'indique pas le véritable bilan d'énergie. Le rendement en wattheures tient compte des variations de tension et de ce fait, il est mieux approprié pour la comparaison d'un rendement.

Le rendement en ampèreheures, d'un accumulateur au plomb, atteint environ 90% tandis que le rendement en wattheures n'est que de 75%.

c. Constitution des accumulateurs au fer-nickel ou accumulateurs alcalins

Le principe de fonctionnement des accumulateurs alcalins est sensiblement le même que celui des accumulateurs au plomb. Pendant la charge, un processus chimique a lieu qui provoque un changement de la composition des électrodes. La figure 23 montre le principe de la constitution d'un accumulateur alcalin. Parmi les accumulateurs alcalins on distingue les *accumulateurs au fer-nickel* et ceux au *nickel-cadmium*. La différence réside dans le matériel des électrodes.

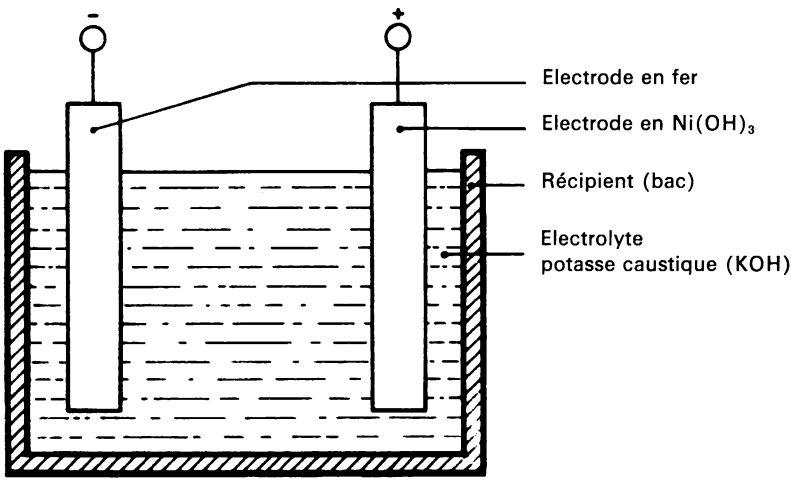


Figure 23 : Constitution d'un accumulateur au fer-nickel

Avant la charge, la plaque positive se compose d'hydroxyde de nickel et la plaque négative d'hydroxyde de fer. L'électrolyte utilisé est de la potasse diluée. Pendant la charge, la plaque positive est transformée en $Ni(OH)_3$ et la plaque négative est transformée en fer. La potasse caustique ne participe pas à la réaction chimique et par conséquent sa densité n'indique pas l'état de charge de l'accumulateur. Lors de la décharge le processus chimique est inversé et les électrodes reprennent leur composition primitive.

d. Le comportement en fonctionnement d'un accumulateur au fer-nickel

La F.E.M. de ce type d'accumulateur est en moyenne de 1,2 V par cellule. Comme pour l'accumulateur au plomb, sa résistance interne dépend de la grandeur des électrodes mais elle est cependant plus élevée que pour celui-là. Le rendement de l'accumulateur alcalin est moins bon que celui de l'accumulateur en plomb. Le rendement en ampèreheures atteint environ 70% et celui en wattheures est en moyenne de 60%.

e. Surveillance, entretien

L'accumulateur au plomb réclame des soins réguliers et attentifs. Toutes les 3 à 5 semaines, il devrait être déchargé et rechargé. L'entretien de l'accumulateur au plomb n'est pas sans danger car, lorsqu'il est en charge, un danger d'explosion existe aux environs immédiats (ou dans un local), il ne faut donc pas faire de feu. Vers la fin de la charge, l'eau se décompose en hydrogène et en oxygène et leur mélange donne un gaz explosif (le résultat de l'explosion c'est de l'eau). C'est pour cette raison que le niveau de l'électrolyte doit être controlé régulièrement et la décomposition de l'eau doit être complétée par une adjonction d'eau distillée.
L'accumulateur alcalin nécessite une surveillance considérablement moindre. Il peut rester déchargé pendant longtemps sans subir de dégâts. Les petits accumulateurs de ce type sont construits de manière à ne réclamer aucune surveillance : il suffit de les recharger de temps à autre. La durée de vie des accumulateurs alcalins est notablement plus longue que celle des accumulateurs au plomb.

f. Association des sources de tension

Les sources de tension peuvent se grouper en diverses combinaisons. Lors du groupement d'éléments en série, le pôle positif d'un élément est relié avec le pôle négatif de l'élément suivant. Lors du groupement en série, les tensions partielles s'additionnent.
Au contraire, si les sources de tension sont groupées en parallèle, la tension reste la même que celle d'un élément. Par contre, le courant à disposition augmente avec chaque élément ajouté. Afin d'éviter une destruction des accumulateurs, on ne doit, par principe, grouper que des éléments de même tension et de même résistance interne.

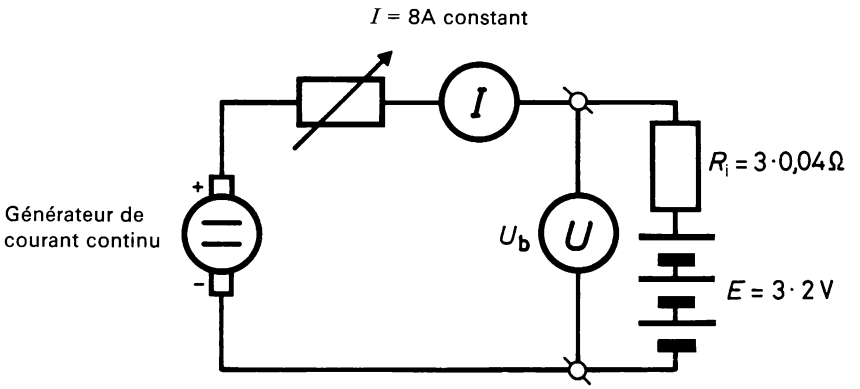
4. Exemples

a. Caractéristiques d'un accumulateur au plomb

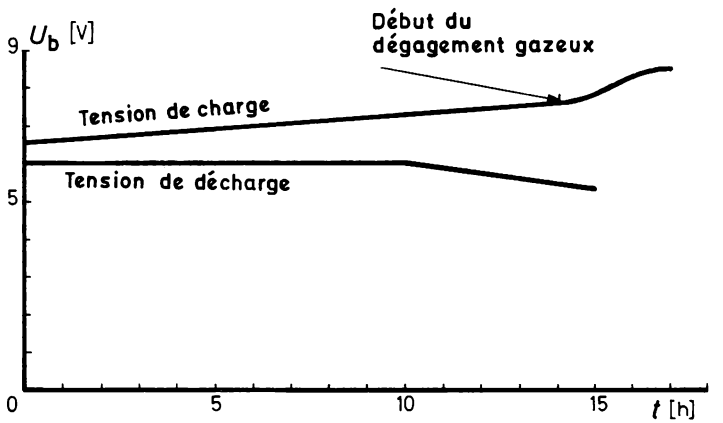
La figure 24 montre un dispositif de charge et les caractéristiques de charge et de décharge d'un accumulateur au plomb. Ce dernier se compose de trois cellules reliées en série. Le dispositif de charge est construit de telle façon que le courant de charge soit maintenu constant par un système de régulation pendant toute la durée de la charge.
Les valeurs suivantes sont connues :

– résistance interne par cellule	0,04Ω
– capacité	120 Ah pour un temps de décharge de 15 h
– rendements	rendement en Ah 90% rendement en Wh 75%
– courant de charge	8 A, constant
– F.E.M. par cellule	2 V
– travail prélevé	920 Wh

Trouver les valeurs suivantes :
- temps de charge nécessaire si l'accumulateur est complètement déchargé ;
- valeur moyenne de la tension aux bornes pour 15 h de temps de décharge ;
- courant de court-circuit, en cas de court-circuit, lorsque chaque cellule a une F.E.M. de 2 V.



Charge d'un accumulateur



Caractéristique de la tension aux bornes lors de la charge et de la décharge

Figure 24

Marche à suivre:

Première étape : calcul du temps de charge

– écrire la formule de base du rendement en Ah

$$\eta = \frac{\text{charge débitée}}{\text{charge absorbée}}$$

$$\eta = \frac{(I \cdot t)_{déb}}{(I \cdot t)_{abs}} \cdot 100\%$$

– transformer la formule de base pour en extraire la « charge absorbée »

$$(I \cdot t)_{abs} = \frac{(I \cdot t)_{déb} \cdot 100\%}{\eta}$$

– isoler t_{abs}

$$t_{abs} = \frac{(I \cdot t)_{déb} \cdot 100\%}{\eta \cdot I}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$t_{abs} = \frac{120 \cdot 100}{90 \cdot 8} \frac{\text{A} \cdot \text{h}\%}{\text{A}\%}$$

$$t_{abs} = \mathbf{16{,}7\ h}$$

Deuxième étape : calcul de la tension moyenne aux bornes

– écrire la formule de base du rendement en Wh

$$\eta = \frac{\text{travail débité}}{\text{travail absorbé}}$$

$$\eta = \frac{(P \cdot t)_{déb}}{(P \cdot t)_{abs}} \cdot 100\%$$

– transformer la formule de base pour en extraire le « travail débité »

$$(P \cdot t)_{déb} = \frac{\eta \cdot (P \cdot t)_{abs}}{100\%}$$

– isoler $P_{déb}$ et transposer en introduisant U

$$P_{déb} = \frac{\eta \cdot (P \cdot t)_{abs}}{t \cdot 100\%}$$

$$U_{déb} = \frac{\eta \cdot (P \cdot t)_{abs}}{t \cdot I \cdot 100\%}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$U_{déb} = \frac{75 \cdot 920}{15 \cdot 8 \cdot 100} \frac{\% \cdot \text{A} \cdot \text{V} \cdot \text{h}}{\text{A} \cdot \text{h} \cdot \%}$$

$$U_{déb} = \mathbf{5{,}75\ V}$$

Troisième étape : calcul du courant de court-circuit

– écrire la formule de base

$$I_{c-c} = \frac{E}{R_i}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$I_{c-c} = \frac{3 \cdot 2}{3 \cdot 0{,}04}$$

$$I_{c-c} = \mathbf{50\ A}$$

b. Caractéristiques d'un accumulateur alcalin

La figure 25 a nous montre la mise en parallèle de deux cellules identiques. Chaque cellule possède une F.E.M. de 1,2 V et une résistance interne de 1,4 ohm. Ici, il s'agit de deux cellules d'accumulateur alcalin dont la capacité et le débit sont faibles. Nous trouvons de telles cellules dans des appareils qui consomment peu de courant. D'après ce schéma, nous voulons étudier les caractéristiques de la source de tension. Nous employons, comme charge, une résistance variable. Nous mesurons le courant et la tension pour diverses valeurs de la résistance de charge. Le tableau 5 nous montre l'ensemble des valeurs mesurées. A partir du courant et de la tension, nous calculons la puissance que nous reportons également sur le tableau 5. Nous vérifions les valeurs mesurées au moyen de la loi d'Ohm.

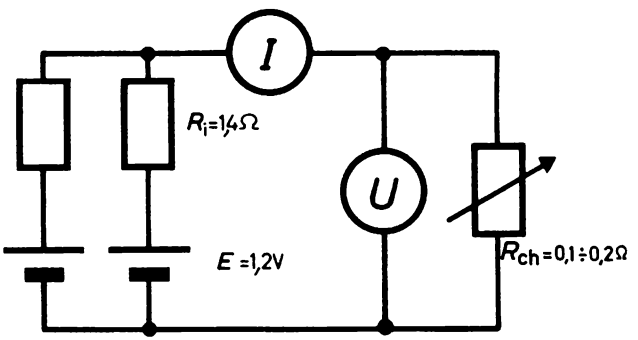


Figure 25a

R_{ch} [Ω]	I [A]	U [V]	P [W]
0,1	1,5	0,15	0,23
0,3	1,2	0,36	0,43
0,5	1,0	0,5	0,5
0,6	0,92	0,55	0,51
0,7	0,86	0,6	0,515
0,8	0,8	0,64	0,51
0,9	0,75	0,67	0,505
1	0,71	0,71	0,50
1,5	0,55	0,83	0,45
2,0	0,44	0,89	0,40

Tableau 5

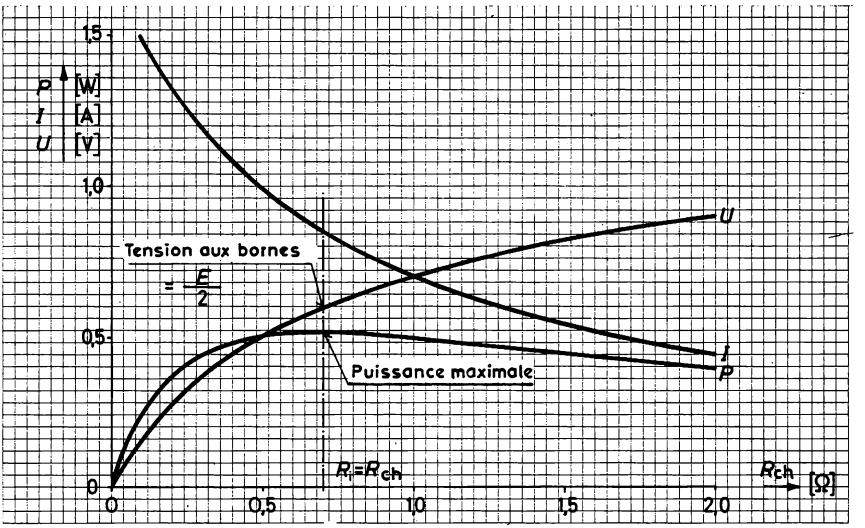


Figure 25b

Pour faire les calculs, nous procédons comme suit :

Marche à suivre:
Première étape : calcul du courant
- écrire la formule de base pour calculer le courant ; les deux cellules étant en parallèle, la résistance interne n'est que la moitié de celle de chaque cellule. Chaque cellule ne fournit que la moitié du courant de charge.
- introduire les valeurs et faire le calcul (dans cet exemple nous n'effectuons le calcul que pour une seule valeur de la résistance de charge)

$$I = \frac{E}{\frac{R_i}{2} + R_{ch}}$$

$$I = \frac{1{,}2}{\frac{1{,}4}{2} + 1{,}5}$$

$$I = \mathbf{0{,}55\ A}$$

Deuxième étape : calcul de la tension aux bornes
- écrire la formule de base de la tension
- introduire les valeurs et faire le calcul

$$U_b = I \cdot R_{ch}$$

$$U_b = 0{,}55 \cdot 1{,}5$$

$$U_b = \mathbf{0{,}83\ V}$$

Troisième étape : calcul de la puissance utilisée

– écrire la formule de base donnant la puissance	$P = U \cdot I$
– introduire les valeurs et faire le calcul	$P = 0{,}83 \cdot 0{,}55\ \text{V} \cdot \text{A}$
	$P = \mathbf{0{,}46\ W}$

Les valeurs obtenues pour les différentes résistances de charge, selon tableau 5, sont réunies dans le diagramme de la figure 25 b. Il est plus facile de suivre les variations de plusieurs valeurs sur un diagramme que sur un tableau. Maintenant, nous allons expliquer ces courbes. La courbe du courant nous montre que celui-ci diminue lorsque la résistance de charge augmente. La courbe de la tension montre une tendance contraire à celle de la courbe du courant. L'allure de ces deux courbes nous apparaît comme une conséquence logique de la loi d'Ohm. Plus la résistance de charge diminue, plus le courant de charge augmente, car le courant et la résistance se comportent, l'un vis-à-vis de l'autre, d'une manière inversément proportionnelle. Plus la valeur du courant de charge augmente, plus la chute de tension augmente dans la résistance interne de la source de tension. Comme nous le savons, cette chute de tension est soustraite de la F.E.M. pour obtenir la valeur de la tension aux bornes : ce fait explique l'allure de la courbe de tension. La courbe la plus importante est celle de la puissance. Pour les petites valeurs de la résistance de charge la courbe monte rapidement, elle atteint son maximum pour une résistance de charge de 0,7 ohm, c'est-à-dire que : *la plus grande puissance peut être prélevée de la batterie lorsque la résistance de charge est devenue égale à la résistance interne de la batterie.* Cet énoncé est valable pour toutes les sources de tension. Nous verrons plus tard que nous y reviendrons lors de l'étude des circuits contenant des tubes et des transistors. Faire la preuve de la véracité de cet énoncé n'est pas facile et nécessite l'emploi des mathématiques supérieures pour démontrer que la courbe n'atteint son maximum que lorsque la résistance interne et la la résistance de charge sont égales.

5. L'essentiel

Dans l'élément secondaire les processus chimiques sont réversibles. Après avoir été déchargé l'accumulateur peut être à nouveau rechargé ; sa capacité se mesure en ampèreheures. Pour déterminer le rendement d'un accumulateur nous utilisons le rendement en ampèreheures ou le rendement en wattheures. Le rendement en wattheures indique le véritable bilan d'énergie de l'accumulateur.

L'accumulateur au plomb a une plus petite résistance interne que celle de l'accumulateur alcalin et pour cette raison l'accumulateur au plomb demande une plus grande surveillance.

Des sources de tension identiques peuvent être reliées en série ou en parallèle. Cette réunion s'appelle une batterie. La connexion des éléments en série augmente la F.E.M. mais aussi la résistance interne. Si l'on reliait des éléments en parallèle (ce qui ne se fait pas), la F.E.M. resterait la même, mais la résistance interne serait plus faible. Une source de tension délivre toujours la plus grande puissance lorsque la résistance de charge est la même que la résistance interne.

6. Exercices de répétition (solutions page 424)

a) De quoi se compose l'électrolyte d'un accumulateur au plomb ?
b) Sous quelle forme l'électrolyte évaporé est-il remplacé dans un accumulateur au plomb ?
c) Quelles sont les mesures de précaution à observer lors de la charge d'un accumulateur au plomb ?
d) Quelle est l'unité de mesure de la capacité des accumulateurs ?
e) Expliquez les deux unités de mesure donnant le rendement d'un accumulateur ?
f) Laquelle de ces deux unités donne une image réaliste du rendement ?
g) Quel est l'avantage principal de l'accumulateur alcalin (Fe-Ni) par rapport à l'accumulateur au plomb ?
h) Quel accumulateur présente le meilleur rendement, celui au plomb ou au fer-nickel ?
i) Quelle sorte d'accumulateur permet d'atteindre la plus faible résistance interne, l'accumulateur au plomb ou celui au fer-nickel ?
k) La densité de l'acide est-elle une mesure de l'état de charge de la cellule ?
l) La densité de la potasse (base) est-elle une mesure de l'état de charge de la cellule ?
m) 6 cellules d'un accumulateur au plomb, ayant une F.E.M. de 2 V et une résistance interne de 0,01 ohm, sont reliées en série. Pour quelle résistance de charge cette batterie peut-elle donner la plus grande puissance ? Dans ce cas, quelle est la tension aux bornes ?
n) 4 cellules d'un accumulateur alcalin (Fe-Ni), ayant une F.E.M. de 1,2 V et une résistance interne de 0,8 Ω, sont reliées en parallèle. Quelle est la valeur du courant en cas de court-circuit ?

C. Le magnétisme

I. Les aimants permanents

1. Introduction

Le magnétisme et l'électricité sont de proches parents. Bien des manifestations de l'électricité sont conditionnées par des phénomènes magnétiques et inversement. La compréhension d'une quantité de phénomènes nécessite la connaissance des lois fondamentales du magnétisme.

2. Que savez-vous au sujet des aimants permanents ? (solutions page 425)

a) Connaissez-vous un exemple d'utilisation du magnétisme terrestre ?
b) Où des lignes d'un champ magnétique apparaissent-elles ?
c) Comment rendre visibles de telles lignes de champ ?
d) Nommez un matériau qui puisse être utilisé à la fabrication d'aimants permanents.

3. L'aimant permanent

a. Qu'est-ce qu'un aimant permanent ?

Un *aimant permanent* se compose d'une matière qui, après avoir été *aimantée*, garde son aimantation. Ces matériaux durs, nommés ferromagnétiques, sont l'acier trempé ou des alliages spéciaux dont la plupart contiennent de l'acier et du nickel comme matières de base. Il est facile de montrer l'existence du magnétisme en approchant un morceau de fer à l'une des extrémités du barreau et vers son milieu nous trouvons une zone neutre où le fer n'est plus attiré. On dit que l'aimant permanent présente deux *pôles*.

b. Propriétés et comportement des aimants permanents

L'exemple d'utilisation le plus connu des aimants permanents c'est l'aiguille aimantée de la boussole. Sous l'influence du champ magnétique terrestre, l'aiguille de la boussole prend toujours la direction nord-sud. Le comportement de l'aiguille de la boussole a conduit à la désignation des pôles d'un aimant permanent.
Le pôle nord de l'aiguille aimantée indique le nord et le pôle sud indique le sud. Les pôles nord et sud de deux aimants permanents exercent une force entre eux. Les pôles de même nom se repoussent et ceux de noms

contraires s'attirent. Par conséquence, paradoxalement, le pôle Nord géographique de la Terre est un pôle magnétique Sud ! La zone d'influence d'un aimant, dans laquelle agissent ses forces, s'appelle *champ magnétique*.
Un morceau d'acier se laisse transformer en un aimant permanent lorsqu'il est frotté de façon uniforme et dans le même sens avec un autre aimant. Il semble bien que ce processus a orienté quelque chose à l'intérieur du barreau d'acier. Si nous coupons en deux, par le milieu, le barreau ainsi magnétisé nous obtenons deux nouveaux barreaux aimantés possédant chacun deux pôles. Cette division peut être répétée à loisir et nous obtenons toujours deux nouveaux aimants permanents. Si nous poursuivons la division assez longtemps nous obtiendrions de minuscules barreaux aimantés ayant l'ordre de grandeur des molécules. A cause de leur petitesse, ces aimants sont nommés *aimants moléculaires*.
Le barreau aimanté se compose d'un nombre infiniment grand de ces aimants moléculaires. Dans l'état non magnétique, ces aimants moléculaires sont disposés de façon désordonnée et aléatoire (en fouillis) l'un par rapport à l'autre. Lorsque le barreau est magnétisé, tous les aimants moléculaires s'orientent dans la même direction. Quand ils sont tous orientés il se produit, aux extrémités du barreau, l'effet magnétique bien connu, Dans le fer une orientation complète des aimants moléculaires est possible, par conséquent il est employé comme matière de base pour la fabrication des aimants. La figure 26 nous montre la division d'un barreau aimanté.

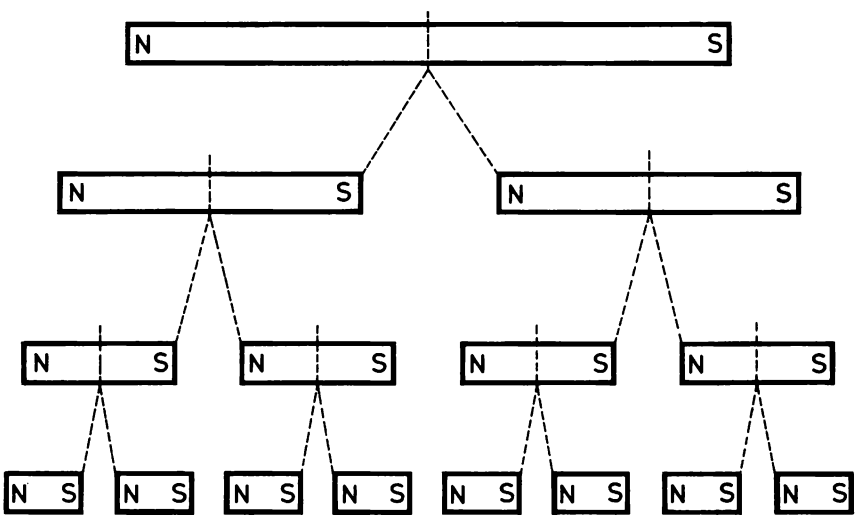
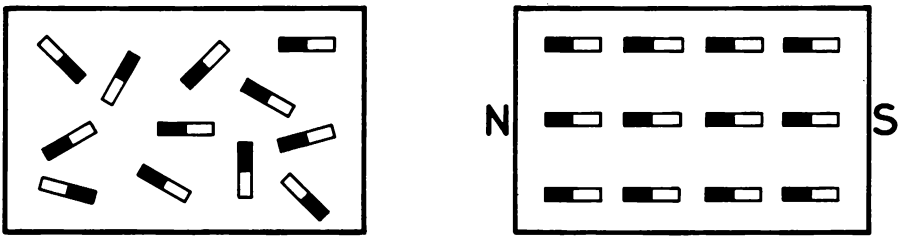


Figure 26

La figure 27 nous montre un barreau d'acier non magnétique dont les aimants moléculaires sont désordonnés et le même barreau, aimanté, dans lequel tous les aimants moléculaires sont orientés dans le même sens.



Aimants moléculaires désordonnés — Aimants moléculaires ordonnés

Figure 27

Les aimants moléculaires doivent pouvoir se tourner à l'intérieur du barreau d'acier. La mobilité de ces aimants élémentaires n'est pas la même pour toutes les sortes d'acier. Dans l'acier doux les aimants moléculaires sont orientés de façon moins rigide (plus mobiles), il se laisse donc plus facilement magnétiser que l'acier dur. L'acier dur conserve son magnétisme plus longtemps que l'acier doux, pour cette raison il est utilisé pour la fabrication d'aimants permanents.

La figure 28 nous montre une expérience classique: les lignes du champ magnétique sont rendues visibles à l'aide de limaille de fer. Pour ce faire nous répandons de la limaille de fer sur une feuille de papier sous laquelle se trouve un barreau aimanté. Nous voyons nettement les lignes du champ sortir des pôles et y rentrer. A l'intérieur de l'aimant les mêmes lignes de champ s'y prolongent de façon à ce que le circuit des lignes du champ magnétique soit fermé.

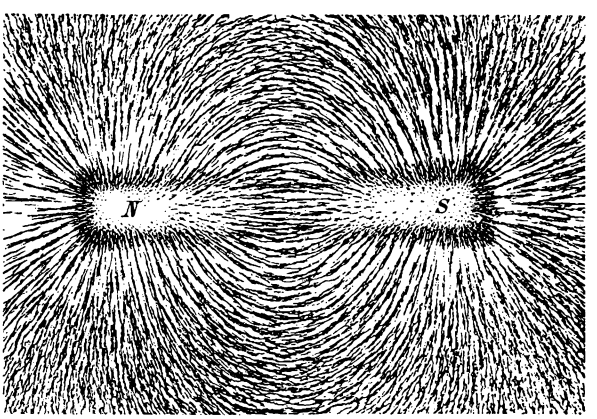


Figure 28

Comme pour le sens du courant, qui fut fixé de façon conventionnelle, on a aussi déterminé le sens des lignes du champ magnétique.
La règle s'exprime ainsi :
Les lignes du champ « quittent » le fer au pôle nord et y reviennent au pôle sud. Ce sens est désigné par le terme : sens positif du champ.

c. Les caractéristiques des aimants permanents

L'intensité de la force magnétique de l'aimant permanent doit pouvoir se définir et se mesurer. Les unités de mesure de l'ancien système de mesures absolues (CGS) sont encore souvent employées pour les circuits magnétiques. Les unités de mesure du système Giorgi (MKSA) permettent la définition des valeurs des circuits magnétiques au moyen des quatre unités fondamentales ; cependant, elles sont basées sur les électro-aimants. Nous allons comparer, l'une par rapport à l'autre, les unités des deux systèmes de mesure car ici les unités du système Giorgi nous semblent encore étranges à première vue. Nous en prenons connaissance ; le prochain chapitre « Electro-aimants » nous instruira en ce qui concerne leur interdépendance.
Le *flux magnétique* est la somme de toutes les lignes du champ qui arrivent à un pôle ou en repartent.
Le *champ magnétique* est le nombre de lignes de force qui passent par une section d'un centimètre carré.
Le *potentiel magnétique* correspond au champ magnétique multiplié par la longueur des lignes de force.
L'*induction magnétique* correspond au flux d'induction par unité de surface.

d. Unités de mesure

Grandeurs	Unités de mesure	
	Système de mesure absolu	Système Giorgi
Flux magnétique Φ	Maxwell (Mx)	Vs = Weber (Wb)
Champ magnétique H	Oersted (Oe)	A/m
Potentiel magnétique Um	Gilbert (Gb)	A
Induction magnétique B	Gauss (G)	Vs/m^2 = Tesla (T)

Tableau 6

Pour pouvoir transposer les valeurs d'un système de mesure dans l'autre, on utilise des facteurs de transformation.

$$1\ \text{Oe} = \frac{10^3}{4\pi}\ \text{A/m} = 79{,}6\ \text{A/m}$$

$$1\ \text{Mx} = 10^{-8}\ \text{VS}$$

$$1\ \text{Gb} = \frac{10}{4\pi}\ \text{A} = 0{,}796\ \text{A}$$

Nous remarquerons par la suite que les unités de mesure du système Giorgi sont remarquablement plus pratiques pour les calculs que les anciennes unités du système absolu (CGS). La force du champ magnétique *H* ainsi que l'induction magnétique *B* ont, à *chaque point, une force déterminée par une valeur et un sens. Plus tard, toutes les caractéristiques du magnétisme ne seront traitées que selon leurs valeurs.*

4. L'essentiel

Chaque aimant permanent présente un pôle sud et un pôle nord. Les pôles vont toujours par paires.
La sphère d'action d'un aimant, dans laquelle ses forces s'exercent, se nomme champ magnétique.
Les lignes de champ (lignes de force) sortent de l'aimant à son pôle nord et reviennent à son pôle sud.
L'action de l'aimant permanent provient de la mobilité des aimants moléculaires, lorsqu'il est magnétisé, les aimants moléculaires sont alignés dans le même sens ; dans l'état non magnétisé ils sont disposés de façon désordonnée.
La mobilité des aimants moléculaires est une mesure des propriétés magnétiques d'une matière. Lorsque cette mobilité est grande, une matière peut être facilement magnétisée par contre elle perd, de nouveau aisément, son magnétisme.

5. Exercices de répétition (solutions page 426)

a) Qu'est-ce qu'un champ magnétique ?
b) Quel est le rôle que jouent les aimants moléculaires dans un aimant permanent ?
c) Décrivez le chemin que suivent les lignes de champ (lignes de force) à l'intérieur et à l'extérieur d'un aimant permanent.
d) Comment les lignes du champ magnétique peuvent-elles être rendues visibles ?
e) Pourquoi le fer doux peut-il être plus facilement magnétisé que l'acier dur ?
f) Qu'entendez-vous par le terme de « Flux magnétique » ?
g) Comment le champ magnétique est-il défini ?
h) Que se passe-t-il lorsque nous cassons un barreau aimanté par son milieu ?

II. Electromagnétisme

1. Introduction

Dans la pratique les électroaimants jouent un bien plus grand rôle que les aimants permanents. Les phénomènes qui ont lieu dans les circuits électromagnétiques peuvent s'exprimer par des lois ressemblant à celles utilisées pour le circuit à courant continu. L'électromagnétisme est l'un des piliers sur lequel toute l'électrotechnique est édifiée. Sans la connaissance exacte des phénomènes électromagnétiques, il est impossible de comprendre de façon parfaite le fonctionnement des transformateurs ni celui des bobines d'induction ni celui des circuits oscillants. Lors de l'étude de l'électromagnétisme, la compréhension des processus physiques dans les circuits électromagnétiques est primordiale. Les exemples de calculs doivent uniquement à cette occasion, étayer et confirmer la théorie. Cette exigence va à l'encontre de ce qui a été dit auparavant. C'est un fait que, très souvent, le praticien doit vérifier approximativement le résultat des mesures auxquelles on peut s'attendre. Pour en avoir la possibilité, on doit maîtriser les méthodes de calcul. Cependant, il est à peine probable que vous ayez à refaire les calculs d'un circuit magnétique. Les phénomènes physiques simples, dans les transformateurs ou les bobines requièrent que vous connaissiez les lois fondamentales de l'électromagnétisme. C'est dans cet esprit que nous allons nous occuper de ce domaine.

2. Que savez-vous au sujet de l'électromagnétisme ?
(solutions page 427)

a) Nommez un exemple d'utilisation de l'électromagnétisme.
b) Un électroaimant, alimenté avec du courant continu, a-t-il les mêmes propriétés qu'un aimant permanent ?
c) Des lignes de champ apparaissent-elles aussi autour d'un électroaimant ?
d) Décrivez le principe de la construction d'un électroaimant.
e) De quels facteurs dépend la force du champ magnétique d'un électroaimant ?

3. L'électromagnétisme

a. Qu'est-ce qu'un électroaimant ?

Une bobine parcourue par du courant constitue un électro-aimant. Un noyau de fer, à l'intérieur de la bobine en augmente les propriétés magnétiques.

b. Champ magnétique et conducteur parcouru par du courant

La figure 29 nous montre un conducteur parcouru par du courant et qui traverse une feuille de papier. Ce papier est placé perpendiculairement au

conducteur ; maintenant, nous saupoudrons de la limaille de fer sur le papier ainsi l'existence des lignes de champ est prouvée de la même façon que pour l'aimant permanent.

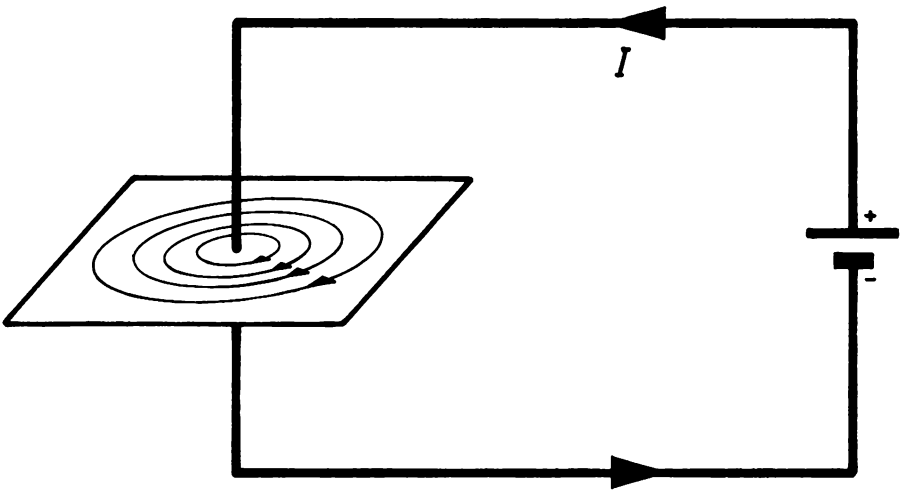


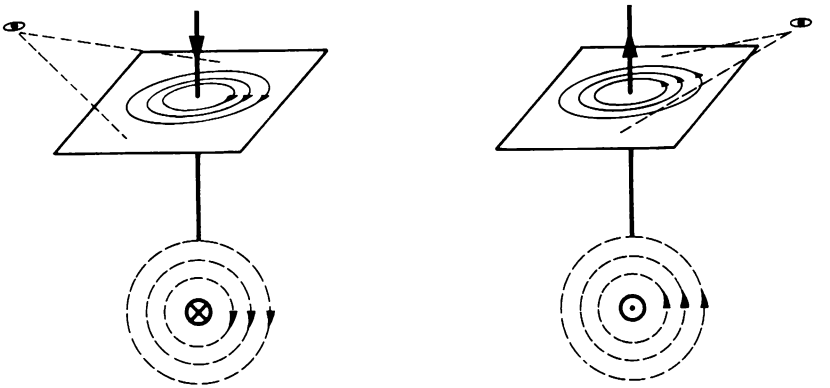
Figure 29

L'expérience montre que des lignes de champ magnétique circulaires se forment autour d'un conducteur parcouru par du courant. Ces lignes de champ concentriques se referment sur elles-mêmes. Avec les aimants permanents nous avons déterminé que les lignes de force sortent du pôle nord et reviennent au pôle sud de l'aimant. A l'aide d'une aiguille de boussole nous déterminons le sens magnétique autour du conducteur. L'aiguille doit se placer tangentiellement par rapport aux lignes de champ concentriques. Si le sens du courant est inversé l'aiguille aimantée se tourne de 180°. Le sens du champ magnétique dépend, par conséquent, du sens du courant. La *règle du tire-bouchon* est un moyen mnémotechnique qui nous permet de déterminer le sens du champ magnétique :
Le sens d'une ligne de champ concentrique au courant est celui de la rotation d'un tire-bouchon progressant dans le sens du courant. La figure 30 élucide la situation.
La force du champ diminue d'autant que la distance augmente entre le conducteur parcouru par le courant et les lignes de champ ; la force du champ est d'autant plus petite que le rayon de la ligne de force est plus grand. Si le courant augmente, la force du champ augmente aussi. Une formule exprime ces constatations.

$$H = 0{,}4\pi \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r} = 0{,}2\,\frac{I}{r}\,[\mathrm{Oe}]$$

(pour le point du champ considéré)

H = force du champ
I = intensité du courant en A
r = rayon en m



Le courant s'éloigne de l'observateur Le courant s'approche de l'observateur

Figure 30

Dans la littérature moderne le champ magnétique H se mesure en ampère par mètre A/m. Souvenons-nous des facteurs de transformation et écrivons la formule ci-dessous de façon à ce que l'unité A/m apparaisse.

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} \qquad [A/m]$$

H = champ magnétique
I = intensité du courant en A
r = rayon en m

Lors de la discussion au sujet des aimants permanents nous avons fait connaissance avec l'expression « potentiel magnétique » (ou : tension magnétique). Nous nous souvenons que la définition du potentiel magnétique est égale au champ magnétique multiplié par la longueur des lignes de champ. Puisque nous avons affaire à des cercles pour les lignes de champ, le calcul se simplifie. La longueur d'une ligne de champ se calcule d'après la formule du cercle :

$$\text{Longueur} = \text{circonférence} = 2\pi \cdot r = l$$

Introduisons cette formule dans celle du calcul du champ en oersteds et nous obtenons l'équation suivante :

$$U_m = H \cdot I = 0{,}2 \cdot \frac{I}{r} \cdot 2\pi \cdot r \qquad \text{et en simplifiant on obtient}$$

$$U_m = 0{,}4 \cdot \pi \cdot I \qquad [A]$$

Nous remarquons que l'unité de mesure du potentiel magnétique est l'ampère. En même temps, nous constatons que le potentiel magnétique est devenu indépendant du rayon du cercle des lignes de champ, un fait qui est bien compréhensible car le champ diminue de valeur lorsque la longueur des lignes de force augmente et, comme le potentiel magnétique est le résultat du produit de la longueur des lignes de force par le champ magnétique sa valeur est indépendante du rayon.

Nous allons maintenant essayer d'établir la même formule mais en y introduisant l'unité A/m pour la force du champ :

$$U_m = \frac{I}{2\pi \cdot r} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \qquad \text{ou, en simplifiant :}$$

$$U_m = I \qquad [A]$$

Les deux résultats se différencient par le facteur $0{,}4\pi$. Ce nombre est une constante du système d'unités absolues (CGS). Nous le rencontrons encore souvent.

c. L'induction magnétique

L'induction magnétique *B* est proportionnelle à la force du champ magnétique *H*. L'expression induction est apparentée avec le verbe induire. L'induction magnétique doit son nom au fait que, dans certaines conditions, un champ magnétique peut induire une tension électrique dans un conducteur. Le mot induction a comme synonymes : causer, occasionner, produire, faire naître, provoquer. Pour mieux comprendre ce phénomène, nous allons faire une expérience dont la figure 31 a nous indique le montage.

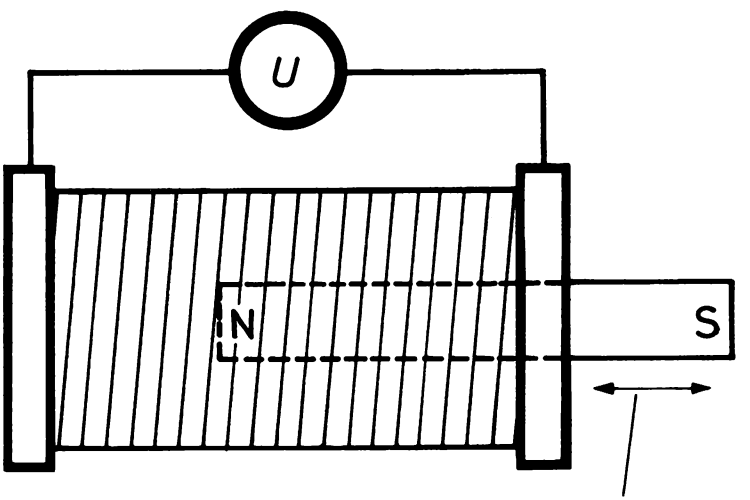


Figure 31a

Figure 31b

Un solénoïde est relié à un voltmètre. Un barreau aimanté est lentement introduit dans la bobine, l'instrument dévie dans un sens, une tension a été *induite.* Lorsque nous retirons l'aimant de la bobine, l'instrument dévie dans le sens opposé. Nous remplaçons la bobine par une autre dont le nombre de spires est le double de celui de la première et nous répétons l'expérience. L'aiguille de l'instrument indique, maintenant, une déviation deux fois plus grande. Si l'aimant est introduit plus rapidement dans la bobine alors l'instrument accuse une déviation plus importante. Nous obtenons le même effet si nous utilisons un aimant plus puissant. Cette expérience nous révèle les notions suivantes :

- Quand un conducteur (bobine) est coupé par un champ magnétique mobile, une tension est induite dans ce conducteur.
- La polarité de la tension induite dépend de la polarité du champ magnétique.
- La tension induite est d'autant plus grande que le champ magnétique est intense, que sa vitesse de déplacement est élevée et que la longueur du conducteur est importante (nombre de spires de la bobine).

Le phénomène décrit s'appelle *induction*. Nous avons constaté que la tension induite est proportionnelle à la force du champ. Par conséquent, la densité des lignes de champ est désignée par induction magnétique. Dans les bobines « dans l'air », qui sont des bobines sans noyau de fer, l'induction magnétique est égale à la force du champ. Dans le système d'unités de mesures absolues (CGS), l'induction magnétique était mesurée en **gauss**. Dans le système moderne Giorgi, le tesla désigne l'unité d'induction magnétique. 1 T = **1 Vs/cm²**. Il existe la relation suivante entre les deux unités de mesure :

$$1 \text{ gauss} = 10^{-4} \text{ tesla} = 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Une bobine dans l'air, présentant par exemple un champ magnétique de 40 Oe possède également une induction magnétique de 40 gauss. On peut écrire :

$B = H$ (l'induction magnétique est égale au champ magnétique, car ici la perméabilité de l'air μ est très proche de 1).

Une bobine dans l'air ayant un champ magnétique de 40 A/cm possède donc une induction magnétique de :

$$B = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \cdot 40 \qquad \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

$$B = 50{,}2 \cdot 10^{-8} \qquad \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Nous retrouvons, dans cette équation le nombre de $0{,}4\pi$, la puissance 10^{-8} et l'unité de mesure : le voltseconde par centimètre carré. Pour former cette unité de mesure, il faut lui adjoindre le rapport des valeurs : $0{,}4\pi \cdot 10^{-8}$. Le champ magnétique est donné en A/cm. Pour obtenir l'unité Vs/cm² il faut par conséquent multiplier le champ magnétique par l'unité Vs/Acm.
Dans l'équation suivante, ces unités sont examinées ;

$B = \mu_o \cdot H$ $\quad H$ = champ magnétique en A/cm
μ_o = constante d'induction en Vs/Acm

$$\mu_o = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \qquad \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}$$

$$\mu_o = 1{;}256 \cdot 10^{-8} \qquad \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}$$

La vérification des unités prouve l'exactitude des unités de mesure :

$$[B] = \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{cm}} = \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

La constante d'induction est aussi nommée, souvent, constante du champ magnétique ou perméabilité du vide. Cette expression, à juste titre, a de quoi décontenancer mais dans la pratique, la constante d'induction n'est uniquement qu'un *facteur de transposition* qui permet de passer du système absolu (CGS) au système Giorgi. Vous vous êtes sûrement déjà posé la question de savoir pourquoi le système Giorgi possède une unité aussi compliquée pour l'induction magnétique ! Il y a deux raisons : le système Giorgi découle des quatre unités fondamentales mètre, kilogramme, seconde, ampère pour définir toutes les autres grandeurs. Ce système a également simplifié le déroulement des calculs.
L'exemple suivant nous montre avec quelle facilité les calculs se font en utilisant le système Giorgi. Nous voulons calculer par avance la tension induite dans un conducteur qui se déplace dans un champ magnétique avec une vitesse donnée. La figure 32 nous montre le principe de cet essai. Le conducteur se déplace avec une vitesse constante à travers un champ magnétique homogène. La tension produite dans le conducteur, pendant la durée de son déplacement dans le champ magnétique doit être calculée.

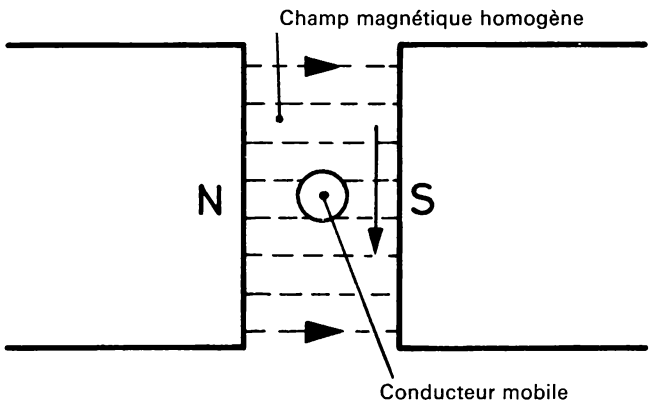


Figure 32

Les données connues du problème sont les suivantes :

Induction magnétique	$B = 1 \cdot 10^{-4}$	$\frac{Vs}{cm^2}$
Vitesse du conducteur	$v = 400$ cm/s	
Longueur du conducteur	$l = 8$ cm	

Nous avons établi précédemment que la tension induite est proportionnelle à la vitesse, à l'induction magnétique et à la longueur du conducteur. Exprimé algébriquement nous obtenons :

$$U_i = B \cdot v \cdot l;\ [U_i] = \frac{Vs}{cm^2} \cdot \frac{cm}{s} \cdot cm = V$$

$$U_i = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 400 \cdot 8$$

$$U_i = \mathbf{0{,}32\ V}$$

Le calcul s'effectue avec une facilité évidente par l'emploi des unités du système Giorgi. Nous retenons cet exemple car nous y reviendrons plus tard, lorsque nous traiterons des inductances.

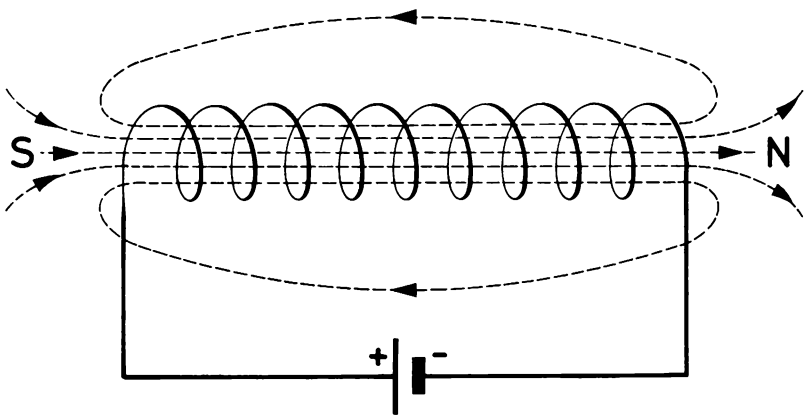


Figure 33

d. La bobine sans fer parcourue par du courant (solénoïde)

Une bobine se compose d'un conducteur enroulé sur un support cylindrique. Si l'on envoie un courant à travers les spires de la bobine, un champ magnétique homogène se forme dans la bobine. Les champs magnétiques de chaque spire se sont unis dans la bobine pour former un champ magnétique commun dont la forme ressemble à celle d'un barreau aimanté.

La figure 33 nous montre une bobine cylindrique parcourue par du courant. Diverses règles permettent de déterminer le pôle nord et le pôle sud de la bobine. Bien connues sont les règles du tire-bouchon, de la main droite et du pôle sud. Toutes ces règles ont l'inconvénient de devoir être apprises par cœur. Toutes les règles apprises par cœur s'oublient facilement ou l'on ne retient que partiellement leur contenu. Pour cette raison, il vaut mieux essayer de trouver soi-même la polarité à l'aide d'un raisonnement logique ou de se servir d'un aide-mémoire garanti contre toute possibilité d'erreur de maniement.

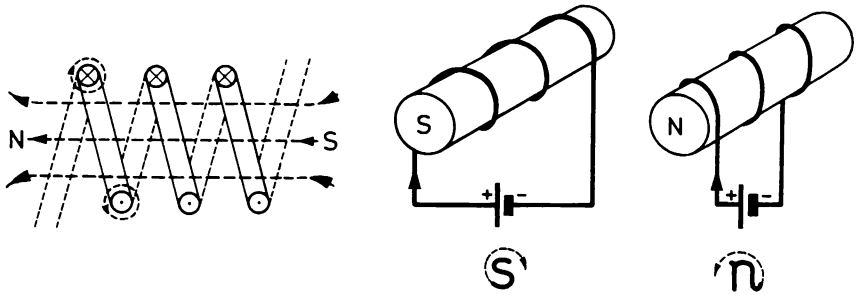


Figure 34

La figure 34 nous montre ces deux possibilités. Le point de départ pour les deux raisonnements est basé sur la simple règle du tire-bouchon. Nous recherchons en premier lieu la polarité d'une seule spire pour laquelle nous nous représentons le sens du champ, comme pour le conducteur rectiligne dont nous avons encore le cas présent en mémoire; en pliant ensuite le conducteur nous formons une spire.
Puis ensuite, nous dessinons une bobine cylindrique en coupe et nous marquons le sens du courant dans chaque spire. Les deux procédés permettent de déterminer les pôles. Celui qui travaille volontiers par mémorisation se représente les lettres minuscules n et s prolongées par des flèches. Le sens de la flèche indique le sens du courant, pour la polarité correspondante que va présenter la bobine, lorsque celle-ci est vue depuis son extrémité. Dans la bobine, l'intensité du champ magnétique est proportionnelle au nombre de spires et au courant.

e. La force magnétomotrice Θ

La force magnétomotrice Θ, dans une bobine parcourue par un courant, est le produit de l'intensité du courant par le nombre de spires.

$$\Theta = I \cdot N \quad [A]$$

L'unité de mesure est l'ampère car le nombre de spires représente une grandeur sans dimension. La force magnétomotrice nous fait retrouver le potentiel magnétique. Dans la bobine, chaque spire participe à l'augmentation du champ magnétique puisque les champs des spires, prises isolément, s'additionnent. Pour cette raison, lors du calcul du potentiel magnétique, dans les bobines, le courant est multiplié par le nombre de spires. Dans la pratique on parle d'*ampères-tours* ($n \cdot I$).

$$U_{mtot} = \Theta = I \cdot N \quad [A]$$

f. Le flux magnétique de l'électroaimant

Le flux magnétique de l'électroaimant ne se différencie pas de celui d'un aimant permanent. Nous voyons de cela que le flux est égal au produit de l'induction magnétique par la surface.

$$\Phi = B \cdot A \quad (A = \text{surface})$$

L'unité de mesure du flux est le voltseconde (Vs). Si nous réunissons les unités dans la formule du calcul de la grandeur du flux, nous voyons par cette preuve, les relations qui conduisent à l'unité de mesure : le voltseconde.

$$[\Phi] = \frac{Vs}{cm^2} \cdot cm^2 = Vs \quad (Wb)$$

Si nous utilisons le gauss pour l'induction, nous obtenons :

$$[\Phi] = Gs \cdot cm^2 = Mx \quad (maxwell)$$

g. La perméabilité

Nous introduisons un noyau de fer dans une bobine cylindrique (dans un solénoïde). Nous constatons alors que l'induction magnétique a très fortement augmenté par rapport à la bobine dans l'air, pour un même nombre de spires et un courant constant. Le fer a la propriété de concentrer les lignes de force. L'effet est remarquable, le champ se renforce plusieurs milliers de fois. La croissance du champ dépend du fer et de son état de magnétisation. Le facteur de l'augmentation du champ est désigné par le terme de *perméabilité* μ. L'indice « r » permet de différencier la *perméabilité relative* μ_r de la constante d'induction μ_o.

La perméabilité relative d'une matière nous indique combien de fois le flux magnétique d'un électroaimant est plus grand lorsque la matière en question est utilisée pour le noyau. La perméabilité relative est une grandeur sans dimension.

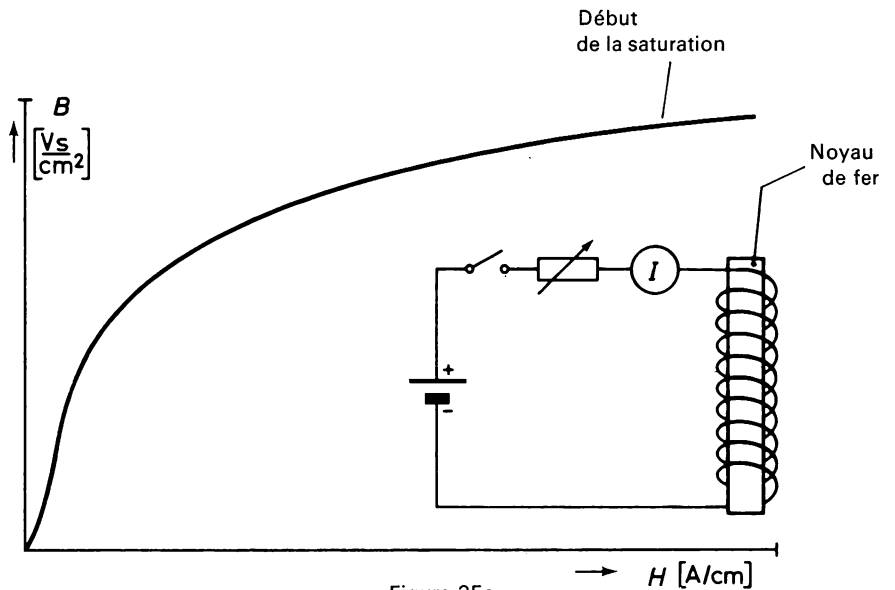


Figure 35a

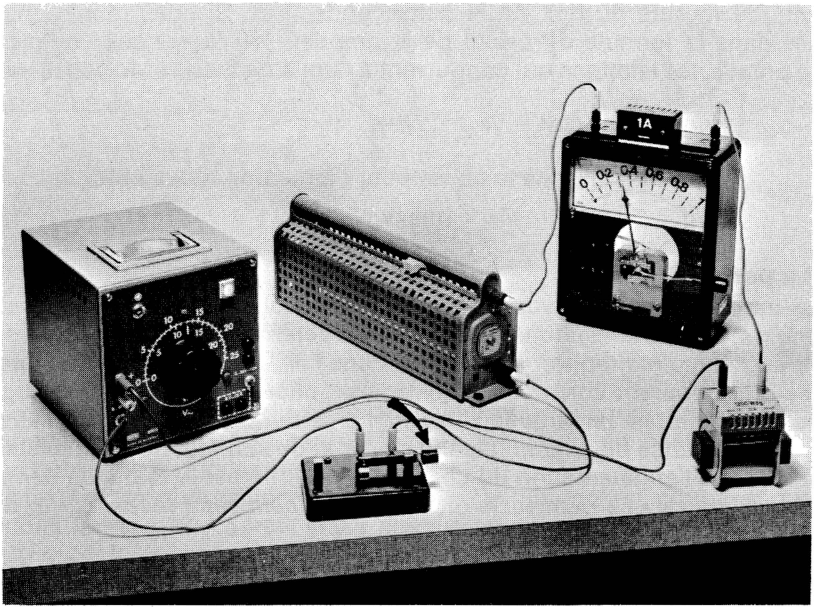


Figure 35b

Le résultat du produit de la constante d'induction par la perméabilité relative est désignée par : *perméabilité absolue* μ

$$\mu = \mu_o \cdot \mu_r ; \; [\mu] = \frac{Vs}{Acm}$$

La perméabilité du fer n'est pas un facteur constant, elle dépend de la sorte de fer et de l'intensité du champ magnétique. Selon la figure 35 a nous magnétisons un noyau de fer et dessinons le diagramme de la dépendance de l'induction magnétique par rapport au champ magnétique. Nous mesurons l'induction magnétique en mesurant la force d'attraction de l'électro-aimant avec une balance et en convertissant les valeurs obtenues. Ce procédé est simple car il existe un rapport direct entre la force d'attraction et la force du champ. La force du champ magnétisant se trouve facilement d'après l'intensité du courant et le nombre de spires. Pour un champ croissant constamment, l'induction magnétique diminue de plus en plus : le fer est saturé, les aimants moléculaires sont presque totalement orientés. Dans la zone de saturation la perméabilité relative n'est que très faible.
Dans l'essai qui va suivre, nous allons examiner de plus près le comportement du noyau de fer.

Nous établissons le dispositif expérimental qui va nous permettre de magnétiser le matériau dans les deux sens.
La figure 36 nous montre le circuit utilisé et la représentation graphique des valeurs obtenues.

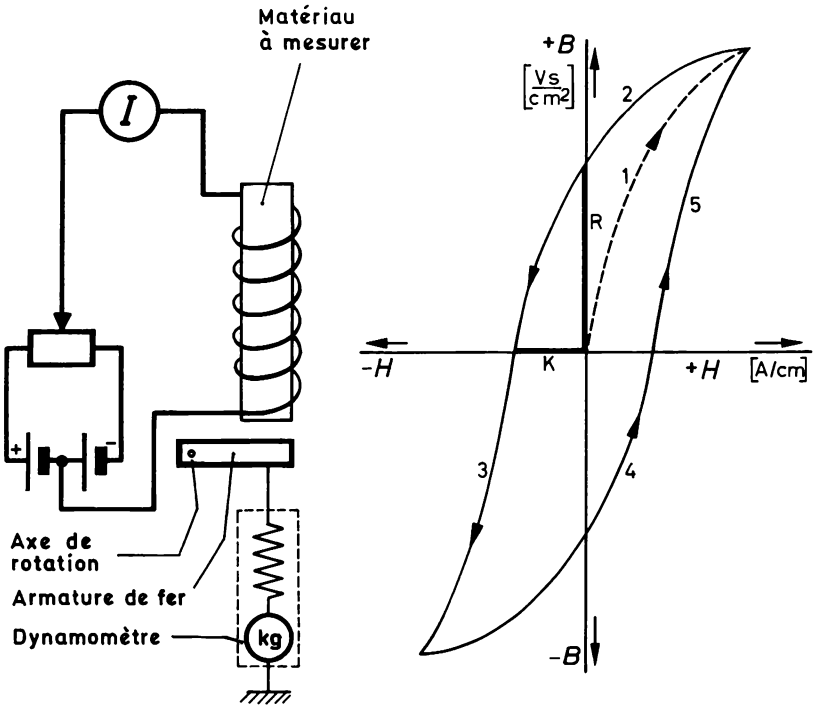


Figure 36

Le courant est envoyé dans la bobine, dans le sens positif en l'augmentant continuellement. L'induction varie selon la courbe 1, dessinée en pointillé. Maintenant, le courant est lentement diminué jusqu'à zéro, l'induction varie selon la courbe 2. Ensuite, on augmente lentement le courant dans le sens négatif jusqu'à atteindre sa valeur maximale et nous obtenons la partie 3 de la courbe. La partie 4 de la courbe nous montre le tracé que nous obtenons lorsque le courant est à nouveau ramené à zéro. La dernière partie 5 de la courbe, s'obtient lorsque le courant est de nouveau augmenté à sa valeur positive maximale.
L'allure de la courbe, fermée sur elle-même, nous donne des informations sur les propriétés magnétiques du fer utilisé.

Cette courbe se nomme : *cycle d'hystérésis* ou courbe *d'hystérésis*. La courbe dessinée en pointillé se nomme « courbe initiale », elle ne se produit que lors de la première magnétisation. La courbe d'hystérésis indique deux valeurs remarquables du matériau : la *rémanence* et la *force coercitive*. Par le terme de rémanence nous entendons le magnétisme restant dans le matériau. Sur le graphique elle est représentée par la distance R, celle-ci nous indique l'induction magnétique restante lorsque l'effet magnétisant de la bobine est tombé à zéro. La force coercitive indique la valeur du champ nécessaire pour annuler le magnétisme restant. Sur le diagramme, la force coercitive est représentée par la distance K. La rémanence et la force coercitive qualifient le matériau magnétique. Un matériau magnétique, tel que l'acier, présente une grande rémanence et une grande force coercitive alors que le fer doux présente une rémanence minime et une faible force coercitive.

h. La loi d'Ohm du circuit magnétique

La loi d'Ohm s'applique aux circuits magnétiques de manière analogue que pour les circuits électriques. Nous connaissons déjà le potentiel magnétique et le flux magnétique. Ce dernier est assimilable au courant dans un circuit. Il nous manque encore la *résistance magnétique*. Cette résistance magnétique est constituée par des composants analogues à ceux de la résistance d'un circuit électrique. Comme conducteurs du flux magnétique on emploie soit l'air ou bien un matériau magnétique, dans la plupart des cas, un alliage de fer. L'équation de la résistance magnétique s'exprime par :

$$R_m = \frac{l}{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A}$$

l = longueur du circuit magnétique
A = section du circuit magnétique

L'unité de mesure pour R_m dans le système Giorgi est $\frac{A}{Vs}$

Dans le système de mesures absolu l'équation est encore plus simple car, là, la constante d'induction tombe :

$$R_m = \frac{l}{\mu_r \cdot A}$$

Par conséquent, l'unité de mesure dans le système absolu est $\frac{1}{cm}$

L'établissement des équations est rigoureusement logique : la résistance du conducteur augmente avec sa longueur, cette même résistance diminue quand la section augmente. La perméabilité joue le rôle de conductibilité spécifique dans les deux équations. La perméabilité peut également être exprimée par analogie avec le mot « conductibilité », plus le matériau est conducteur plus la résistance est faible.

Dans l'exemple qui va suivre, nous allons calculer un circuit magnétique selon les deux systèmes de mesures. La figure 37 nous montre ce circuit. Il se compose d'une bobine d'excitation et d'un noyau interrompu par un entrefer. Sur le graphique des courbes d'aimantation, nous lisons la perméabilité relative pour le matériau du noyau. On cherche le courant nécessaire pour établir un flux déterminé dans l'entrefer. Pour les calculs nous divisons le circuit en deux parties. Nous calculons le potentiel magnétique nécessaire pour le flux dans le noyau et celui pour le flux dans l'entrefer. La somme des deux potentiels donne le potentiel total à partir duquel le courant nécessaire peut être calculé.

Marche à suivre:
Première étape : écrire la loi d'Ohm du circuit magnétique

$$U_m = \Phi \cdot R_m$$

Deuxième étape : calculer le potentiel magnétique pour le flux dans l'entrefer

- écrire la formule de base $U_{mL} = \Phi \dfrac{l}{\mu_o \cdot A}$
- écrire la formule de base donnant Φ $\Phi = B \cdot A$
- introduire Φ dans la formule de base $U_{mL} = \dfrac{B \cdot l}{\mu_o}$
- introduire les valeurs et calculer $U_{mL} = \dfrac{9 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}18}{1{,}256 \cdot 10^{-8}} \dfrac{\text{Vs cm A cm}}{\text{cm}^2\ \text{Vs}}$

  $U_{mL} = \mathbf{1290\ A}$
- mêmes calculs avec les unités de mesures du système de mesures absolu

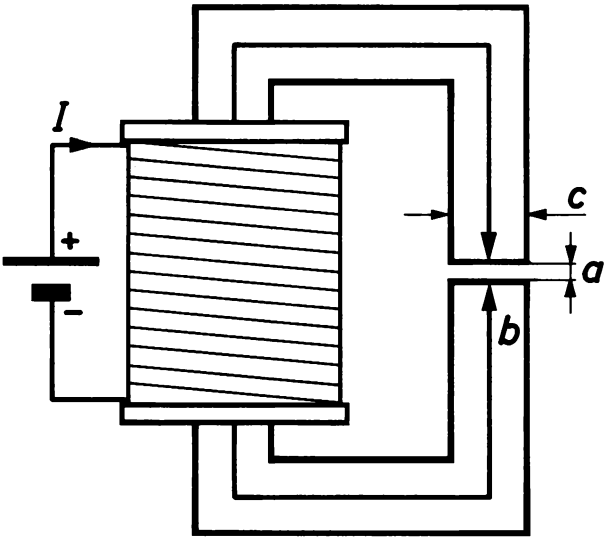
  $U_{mL} = B \cdot l$

  $U_{mL} = 9 \cdot 10^3 \cdot 0{,}18\,\text{Gs} \cdot \text{cm}$ (=gilberts)

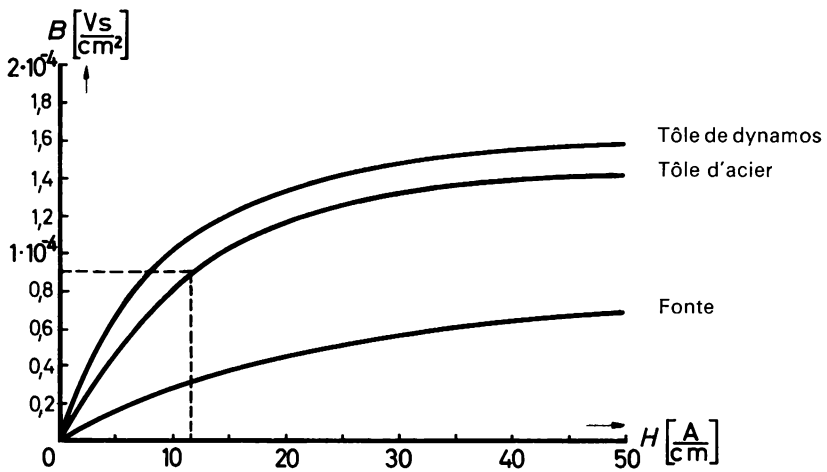
  $U_{mL} = \mathbf{1620\ Gb}$

Troisième étape : calcul du potentiel magnétique pour le flux dans le fer
- les formules finales peuvent être reprises, la résistance magnétique est uniquement multipliée par la valeur réciproque de la perméabilité relative ; le fer étant plus perméable que l'air de la valeur du facteur de la perméabilité relative
- formule finale complétée $U_{mE} = \dfrac{B \cdot l}{\mu_o \cdot \mu_r}$
- introduire les valeurs et calculer $U_{mE} = \dfrac{9 \cdot 10^{-5} \cdot 16}{1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot 650} \dfrac{\text{Vs cm A cm}}{\text{cm}^2\ \text{Vs}}$

  $U_{mE} = \mathbf{177\ A}$



a = 1,8 mm
b = 16 cm
c^2 = 8 cm^2
N = 10000
B = $9 \cdot 10^{-5}$
= 9000 Gs
I = ?



$$\mu_r = \frac{B}{H \cdot \mu_o} = \frac{0{,}9 \cdot 10^{-4}}{11 \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-8}} \quad \frac{\text{Vs} \cdot \text{Acm} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{Vs} \cdot \text{A}} \qquad \mu_r = 650$$

Figure 37

– même calcul avec les unités du système de mesures absolu

$$U_{mE} = \frac{B \cdot l}{\mu_r}$$

$$U_{mE} = \frac{9 \cdot 10^3 \cdot 16}{650}\ \text{Gs} \cdot \text{cm}\ (=\text{Gb})$$

$$U_{mE} = \mathbf{221\ Gb}$$

Quatrième étape : calcul du potentiel magnétique total

– écrire la formule de base $\Theta = U_{mL} + U_{mE}$

– introduire les valeurs et calculer $\Theta = 1290 + 177$

$\Theta = 1467\ \text{A}$

– même calcul avec les unités du système de mesures absolu $\Theta = 1620 + 221$

$\Theta = 1841\ \text{Gb}$

Cinquième étape : calcul du courant nécessaire

– écrire la formule de base $\Theta = I \cdot N$

– tirer I de la formule de base $I = \frac{\Theta}{N}$

– introduire les valeurs et calculer $I = \frac{1467}{10\,000}$

$I = \mathbf{0{,}147\ A}$

– effectuer le même calcul avec les unités du système de mesures absolu $\Theta = I \cdot N \cdot \frac{4\pi}{10}$

$$I = \frac{\Theta \cdot 10}{N \cdot 4 \cdot \pi}$$

$$I = \frac{1841 \cdot 10}{10\,000 \cdot 4 \cdot 3{,}14}$$

$I = \mathbf{0{,}147\ A}$

Les deux formes de calcul doivent conduire au même résultat. Le système Giorgi a le grand avantage de dériver directement des quatre unités fondamentales. Les inconvénients du système de mesures absolu sont nettement visibles : nous devons travailler avec des unités qui nous surchargent car pour chacune d'elles la définition adéquate doit être connue. Le novice peut avoir l'impression que le circuit magnétique est difficile à comprendre et encore plus à calculer. Cette incertitude est causée par le grand nombre d'unités. L'emploi conséquent des unités du système Giorgi nous permet d'y voir plus clair. Ne travaillez qu'avec ces unités et lancez par-dessus bord les unités de mesures du système absolu (CGS) que vous avez apprises par le passé. Vous verrez alors avec quelle rapidité les circuits magnétiques vous deviendront familiers.

Le tableau 7 permet de comparer les grandeurs du circuit magnétique dans les deux systèmes de mesures.

Grandeur	Symbole	Unités de mesure			Relation avec d'autres grandeurs
		Dans le système d'unités absolu	Dans le système Giorgi	Facteur de conversion	
Champ magnétique	H	Oersted (Oe)	A/m, A/cm	1 Oe = $\frac{10}{4\pi}$ A/cm	
Force magnéto-motrice	U_m Θ	Gilbert (Gb) Ampère-tour (AW)	A A	1 Gb = $\frac{10}{4\pi}$ A	$U_m = H \cdot l$ (l = long. des lignes de force) $\Theta = I \cdot N$ (N = nombre de spires)
Flux magnétique	Φ	Maxwell (Mx)	Vs, Weber	1 Mx = 10^{-8} Vs = 10^{-8} Wb	
Induction	B	Gauss (Gs)	Vs/m² Vs/cm² Wb/m²	1 Gs = 10^{-4} Vs/m² 1 Gs = 10^{-8} Vs/cm² 1 Gs = 10^{-4} Wb/m² 1 Gs = 10^{-8} Vs/cm²	$B = \frac{\Phi}{A}$
Constante d'induction	μ_o		Vs/Am Vs/Acm		μ_o = $0{,}4\pi \cdot 10^{-8}$ Vs/Acm = $1{,}256 \cdot 10^{-8}$ Vs/Acm = H/cm
Perméabilité relative	μ_r	sans dimension	sans dimension		
Perméabilité absolue	μ		Vs/Am, Vs/Acm		$\mu = \frac{B}{H}$ $\mu = \mu_o \cdot \mu_r$
Résistance magnétique ou réluctance	R_m	1/cm	A/Vs H^{-1}		$R_m = \frac{U_m}{\Phi}$ $R_m = \frac{l}{\mu_r \cdot A}$ système absolu $R_m = \frac{l}{\mu_o \cdot \mu_o \cdot A}$ système Giorgi l = longueur des lignes de force A = surface de la section

Tableau 7

4. L'essentiel

Autour d'un conducteur parcouru par du courant, un champ magnétique se développe sous la forme de cercles concentriques. La force du champ magnétique en un point quelconque autour de ce conducteur dépend essentiellement du courant dans le conducteur et de la distance du point par rapport au conducteur.

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique, ou si le champ se meut par rapport au conducteur, une tension électrique est induite dans le conducteur. La tension induite est proportionnelle à la force du champ magnétique, à la longueur du conducteur et à la vitesse de déplacement du conducteur ou du champ.

La densité du flux dans le champ magnétique se nomme induction (B). Pour des bobines « dans l'air », l'induction et le champ magnétique ont la même valeur.

Dans des bobines de forme cylindrique – simple solénoïde – parcourues par un courant, il se forme un champ magnétique semblable à celui d'un barreau aimanté. Le champ magnétique à l'intérieur de la bobine « sur l'air » est homogène, il est proportionnel au nombre de spires et au courant dans la bobine. Le produit du nombre de spires par l'intensité du courant se nomme force magnétomotrice.

Comme pour les aimants permanents nous désignons la somme de toutes les lignes de force par le terme de flux magnétique. Dans les champs magnétiques homogènes, le flux correspond au produit du champ magnétique par la surface.

Si l'on introduit un noyau de fer dans une bobine, on augmente ainsi la densité des lignes de force. Le facteur de l'augmentation du champ est désigné par : la perméabilité relative.

Le système Giorgi représente toutes les grandeurs magnétiques au moyen des quatre unités fondamentales m, s, kg et A. Dans le système Giorgi, le rôle d'un facteur de conversion échoit à la constante d'induction. L'unité de cette constante d'induction est choisie de telle façon que les unités fondamentales se retrouvent dans les résultats de tous les calculs.

Afin d'étudier les propriétés magnétiques d'un matériau, sa courbe d'hystérésis est relevée. Cette courbe donne des indications concernant la rémanence et la force coercitive, deux valeurs qui caractérisent le comportement du matériau dans un champ magnétique alternatif.

Chaque circuit magnétique peut se calculer au moyen de la loi d'Ohm appliquée au circuit magnétique. Dans ce cas, la force magnétomotrice a la même signification que la tension électrique dans un circuit électrique. Le flux magnétique correspond au courant électrique alors que, la résistance magnétique est comparable à la résistance ohmique.

5. Exercices de répétition (solutions page 428)

a) Décrivez la forme du champ magnétique créé autour d'un conducteur rectiligne parcouru par un courant.

b) Quelle grandeur caractérise ce champ magnétique ?
c) Comment peut-on déterminer le sens de ce champ ?
d) Quelle est l'unité du champ magnétique dans le système Giorgi ?
e) Qu'entendez-vous par l'expression « induction magnétique » ?
f) Quelle est l'unité de mesure de l'induction magnétique dans le système Giorgi ?
g) Avec quelle grandeur du circuit électrique peut-on comparer la force magnétomotrice ?
h) Quelle est l'unité de mesure de la force magnétomotrice dans le système Giorgi ?
i) Est-ce que la perméabilité relative d'un matériau magnétique a une valeur constante ?
k) Quel est le rôle de la constante d'induction ?
l) Dans quel système de mesures la perméabilité absolue est-elle utilisée et comment est-elle représentée ?
m) Nommez les deux grandeurs les plus caractéristiques qui sont visibles sur le diagramme du cycle d'hystérésis.
n) Qu'est-ce que cela signifie lorsque ces deux valeurs sont grandes ?
o) Pour quelle sorte de fer ces deux valeurs sont-elles faibles ? Expliquez pourquoi.
p) Résolvez le problème suivant avec l'aide du tableau 7.

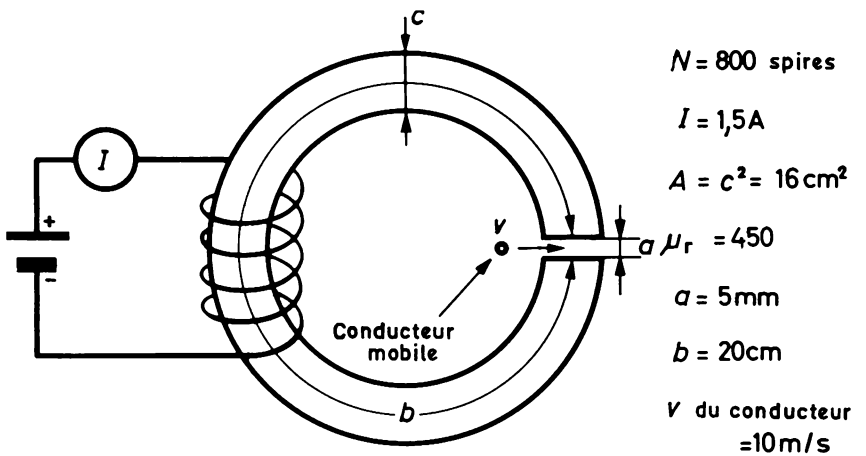


Figure 38

Un conducteur se meut avec une vitesse uniforme dans l'entrefer de l'électro-aimant dessiné ci-dessus. Indiquez la valeur de la tension induite dans le conducteur pendant son déplacement dans le champ de l'électro-aimant. La perméabilité relative indiquée a été trouvée à l'aide d'un diagramme pour l'induction correspondante au courant énuméré.

D. Les principes fondamentaux de la trigonométrie

I. Les fonctions trigonométriques

1. Introduction

Pour calculer des circuits à courant alternatif, qui représentent des résistances effectives et des réactances, la compréhension des fonctions trigonométriques est indispensable. Dans le chapitre suivant nous allons en acquérir les connaissances nécessaires. La trigonométrie englobe le calcul des triangles de tous genres en géométrie plane. De ce vaste domaine, nous voulons extraire la matière qui nous importe le plus afin de nous donner la possibilité d'aborder les circuits à courant alternatif par le calcul.
L'amplitude, la phase et la fréquence sont les grandeurs les plus importantes qui caractérisent les tensions et les courants alternatifs. Le déphasage d'une grandeur alternative est donné en mesures angulaires ou en valeurs d'arc (ou radians). Une fonction angulaire correspond à chaque amplitude liée à un déphasage. Les exemples mentionnés peuvent être développés à volonté, toutefois nous prévoyons que la plupart des expressions de la technique du courant alternatif peuvent être encore inconnues. De ce que nous venons de dire, nous ne retiendrons le fait que nous ne nous intéresserons toutefois qu'aux fonctions angulaires ayant un rapport avec la branche de la trigonométrie dont nous aurons présentement à nous occuper plus en détail.

2. Que savez-vous au sujet des fonctions trigonométriques ?

(solutions page 430)

a) Nommez deux des quatre fonctions les plus utilisées.
b) Nommez une unité de mesure trigonométrique et d'arc.
c) Qu'entendez-vous par l'expression « cercle unitaire » ?
d) Connaissez-vous en électrotechnique un exemple, où une fonction trigonométrique joue un rôle ?
e) Que faut-il connaître d'un triangle rectangle pour qu'une fonction trigonométrique puisse être déterminée ?
f) Est-il possible de définir les fonctions trigonométriques d'un angle plus grand que 90° ?

3. Les fonctions trigonométriques

a. Le cercle unitaire

Le cercle unitaire est celui dont le rayon est égal à l'unité. Ici, il peut s'agir de n'importe quelle unité de mesure, le rayon peut avoir une longueur d'un centimètre, un kilomètre ou un millimètre, cela ne joue aucun rôle. La seule

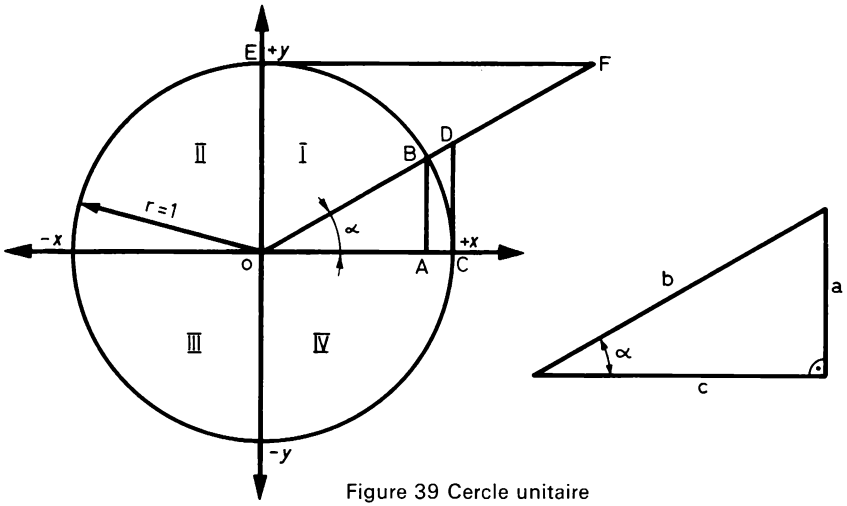


Figure 39 Cercle unitaire

condition est que tous les côtés du triangle rectangle inscrit dans le cercle soient mesurés avec la même unité de mesure que celle du rayon du cercle. La figure 39 nous montre les relations dans le cercle unitaire.

Nous traçons un axe horizontal passant par le centre du cercle que nous nommons : axe des X (ou abcisse). Perpendiculairement à l'axe des X nous traçons l'axe des Y (ou ordonnée) qui coupe le premier au centre du cercle. Le lieu d'intersection des deux axes est le point zéro pour chacun d'eux. Depuis le point zéro, les valeurs positives sont portées sur les axes vers la droite et vers le haut, tandis que les valeurs négatives sont portées à gauche et en bas. Les deux axes forment ce que l'on nomme un système de coordonnées rectangulaires. Le cercle unitaire coupe les axes pour une valeur un. Dans un système de coordonnées, on distingue quatre quadrants. Le premier quadrant est limité par l'axe positif des X et l'axe positif des Y. La numération pour les autres quadrants se fait dans le sens inverse des aiguilles de montre (sens trigonométrique positif).

b. Les fonctions trigonométriques dans le cercle unitaire

Les *fonctions trigonométriques* sont des rapports déterminés entre les côtés d'un triangle rectangle. Dans le cercle unitaire de la figure 39, la valeur de la *fonction du sinus* est représentée par la droite $\overline{AB}$. Selon la figure 39, la valeur de la fonction du sinus pour l'angle alpha (α) provient du rapport entre le côté a du triangle rectangle et son côté b. Toujours selon la figure 39, le côté b correspond au rayon du cercle unitaire. C'est la raison pour laquelle la droite AB, dans le cercle unitaire, est identique à la valeur du sinus de l'angle α car, dans ce cas, le rayon est égal à l'unité. Le *cosinus* de l'angle α, dans le cercle unitaire, est représenté par la droite $\overline{OA}$.

Dans le triangle rectangle extérieur au cercle unitaire, sa valeur est définie par le rapport entre le côté c et le côté b. La valeur de la *tangente* est représentée par la droite $\overline{CD}$ dans le cercle unitaire. Dans le triangle rectangle le rapport entre le côté a et le côté c donne la même valeur. Dans le cercle unitaire la *cotangente* est représentée par la droite $\overline{EF}$ alors que, dans le triangle rectangle, elle est déterminée par le rapport entre le côté c et le côté a. Le tableau 8 nous montre une vue d'ensemble de ces quatre fonctions trigonométriques.

Fonction de l'angle α	Définition de la droite dans le cercle unitaire	Rapport dans le triangle équilatéral
sin α	$\overline{AB}$	$\frac{a}{b}$
cos α	$\overline{OA}$	$\frac{c}{b}$
tg α	$\overline{CD}$	$\frac{a}{c}$
ctg α	$\overline{EF}$	$\frac{c}{a}$

A la place de tg et ctg on emploie parfois tan et cotg.

Tableau 8

De l'étude du cercle unitaire nous déduisons encore une loi qui nous sera utile plus tard, pour déterminer les fonctions trigonométriques d'après les tables ou avec la règle à calcul :

$$\sin \alpha = \cos (90° - \alpha)$$
$$\cos \alpha = \sin (90° - \alpha)$$
$$\text{tg } \alpha = \text{ctg } (90° - \alpha) = \frac{1}{\text{ctg}\alpha}$$
$$\text{ctg } \alpha = \text{tg } (90° - \alpha) = \frac{1}{\text{tg } \alpha}$$

Les valeurs des différentes fonctions trigonométriques changent de signe suivant le quadrant dans lequel nous les trouvons. Pour la fonction du sinus et du cosinus la détermination du signe est simple, là, les deux fonctions se situent soit sur l'axe des X soit sur celui des Y ; les signes correspondent alors à ceux des axes correspondants. La détermination des signes est plus difficile pour la tangente et la cotangente car là, nous devons considérer les signes des deux côtés du triangle. Le tableau suivant donne une vue d'ensemble concernant les signes des fonctions trigonométriques dans les quatre quadrants :

Quadrant Fonction	I	II	III	IV
sin	+	+	−	−
cos	+	−	−	+
tg	+	−	+	−
ctg	+	−	+	−

c. Les unités de mesure des angles

Les angles sont mesurés en degrés ou en longueur d'arc (en radians). L'unité la plus employée est le degré; il faut 360° pour faire un cercle. La mesure d'arc dont l'unité est le radian (rad) se rapporte au cercle unitaire. Un angle d'un radian est déterminé par le rayon d'un cercle reporté sur sa circonférence (= 57° 17′ 45″). On indique donc l'angle en longueur d'arc par rapport au rayon unité. La circonférence comprend 2π radians.

d. Représentation graphique des quatre fonctions trigonométriques

On calcule les valeurs des fonctions trigonométriques au moyen de tables ou à l'aide de la règle à calcul. Si ces deux moyens font défaut, les valeurs de ces fonctions peuvent se mesurer en dessinant un cercle de rayon aussi grand que possible et en y reportant les divisions angulaires. On trouve la valeur cherchée en mesurant la longueur délimitée par l'angle correspondant. A ce propos il faut naturellement tenir compte de l'échelle choisie pour le rayon. La figure 40 montre la représentation graphique des fonctions du sinus et du cosinus, tandis que la figure 41 représente les fonctions de la tangente et de la cotangente.

Nous constatons que les fonctions du sinus et du cosinus ont la même forme et ne se différencient que par la position de leur phase (déphasage). La différence de phase exprimée en degrés est de 90° et de $\pi/2$ en radians (longueur d'arc). Les fonctions de la tangente et de la cotangente ont également des formes identiques mais leurs traces se déroulent, l'une par rapport à l'autre, comme reflétées par un miroir.

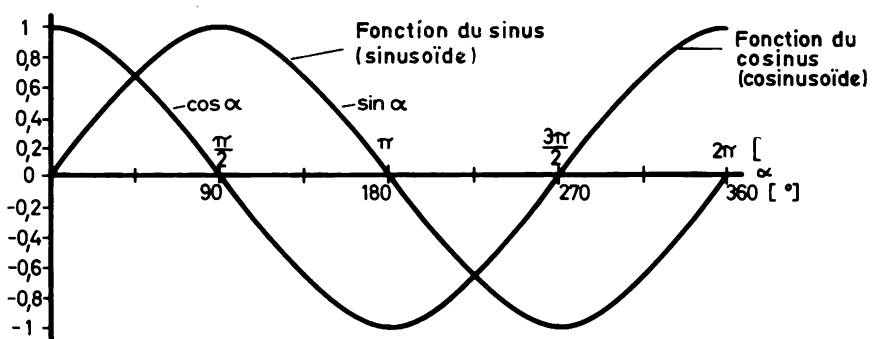


Figure 40

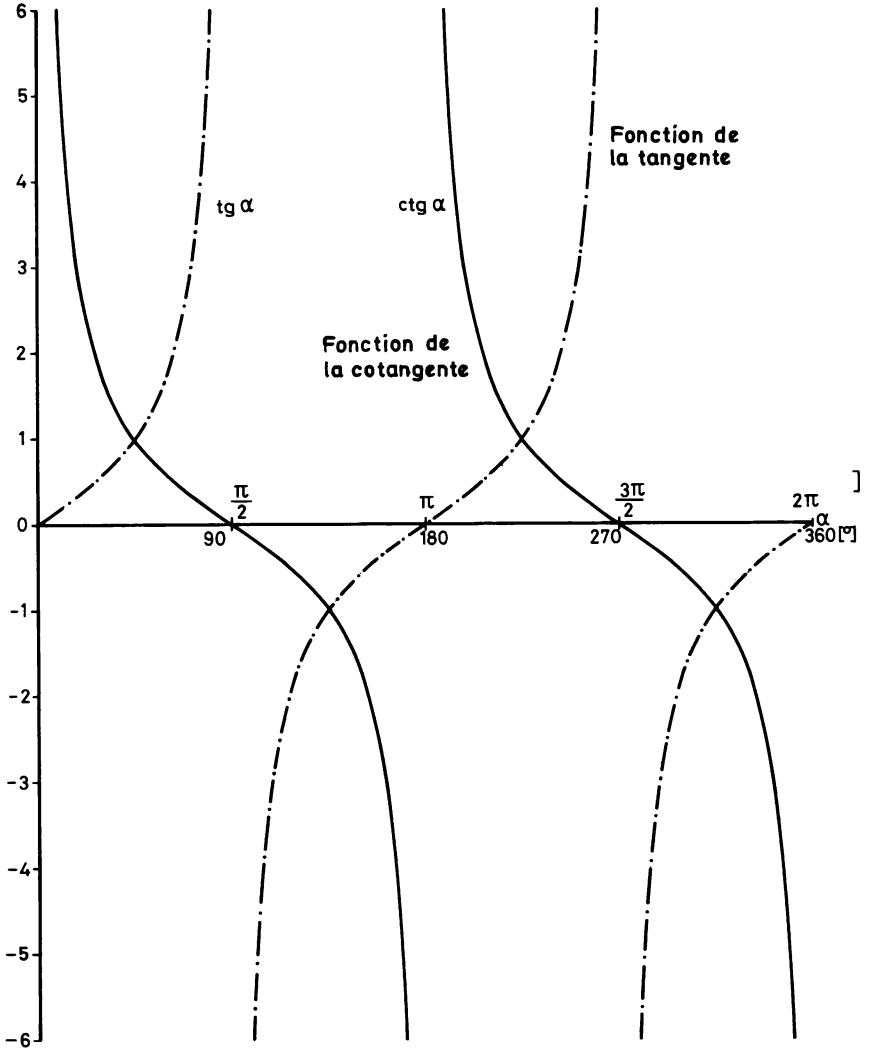


Figure 41

La valeur de la tangente part de zéro en augmentant pour atteindre la valeur positive infinie puis passe brusquement à la valeur négative infinie et revient à la valeur zéro. La cotangente se comporte de façon inverse: elle arrive de la valeur positive infinie, passe par zéro pour atteindre une valeur négative infinie. De là, la courbe passe brusquement à la valeur positive infinie pour revenir à zéro. Ce comportement des deux fonctions est facilement compréhensible; par contre, les valeurs sont réciproques l'une par rapport à l'autre.

4. Exemples

a. Détermination de la fonction du sinus pour quatre angles dans les quatre quadrants avec l'aide du cercle unitaire

Marche à suivre:

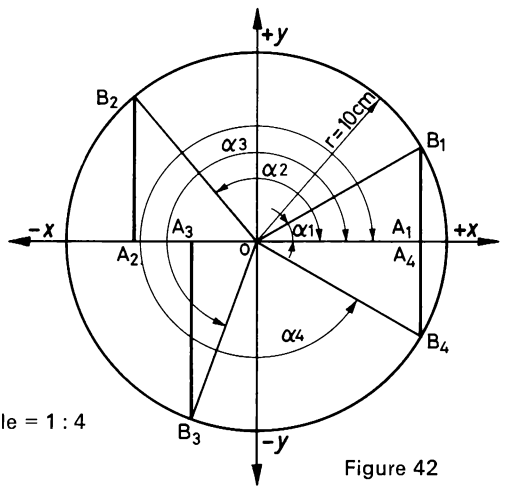
Sur un cercle unitaire dont le rayon est de 10 cm nous reportons les angles suivants :

$$\alpha_1 = 30°,\ \alpha_2 = 130°,\ \alpha_3 = 250°,\ \alpha_4 = 330°$$

Nous traçons maintenant les droites déterminées par les angles et mesurons leur longueur. En tenant compte de leur signe nous obtenons les valeurs suivantes :

$$\sin \alpha_1 = 0{,}5,\ \sin \alpha_2 = 0{,}766,\ \sin \alpha_3 = 0{,}940,\ \sin \alpha_4 = -0{,}5$$

La figure 42 explique cette marche à suivre.



Echelle = 1 : 4

Figure 42

$\sin \alpha_1 = \overline{A_1B_1}$
$\sin \alpha_2 = \overline{A_2B_2}$
$\sin \alpha_3 = \overline{A_3B_3}$
$\sin \alpha_4 = \overline{A_4B_4}$

b. Détermination de la fonction du sinus pour quatre angles dans les quatre quadrants à l'aide d'une table ou de la règle à calcul

Les quatre fonctions trigonométriques de l'exercice a doivent être déterminées à l'aide d'une table ou de la règle à calcul.

$\alpha_1 = \mathbf{30°}$

Marche à suivre:

Nous cherchons dans la table ou sur la règle à calcul la valeur du sinus pour l'angle de 30° :

$$\sin \alpha_1 = \mathbf{0{,}5}$$

La détermination des fonctions trigonométriques d'angles situés dans le premier quadrant est simple. Toutes les valeurs des fonctions de l'angle compris entre 0 et 90° se lisent directement dans la table.

Lorsque nous essayons, avec la règle à calcul, de trouver la valeur des fonctions du sinus pour des angles plus petits que 6° ou plus grands que 84° pour le cosinus, nous constatons qu'elles ne sont pas directement lisibles. De même, la lecture directe des valeurs de la tangente est difficile pour des angles supérieurs à 45° tandis que pour la cotangente, la lecture n'est directement possible qu'à partir de 45°. Dans un paragraphe ultérieur, nous apprendrons comment trouver tout de même toutes les valeurs des fonctions avec la règle à calcul.

$\alpha_2 =$ **130°**

Marche à suivre:

– détermination du quadrant:	α_2 se trouve dans le deuxième quadrant
– détermination du signe:	le signe est positif
– détermination de la valeur:	sin α_2 = **0,766**

Pour déterminer la valeur, il est premièrement nécessaire de chercher l'angle compris entre 0° et 90° qui correspond à la valeur de la fonction de l'angle de 130°. Nous transposons l'angle du deuxième quadrant dans le premier en soustrayant α^2 de 180° (180° – 130° = 50°).

$\alpha_3 =$ **250°**

Marche à suivre:

– détermination du quadrant:	α_3 se trouve dans le troisième quadrant
– détermination du signe:	le signe est négatif
– détermination de la valeur:	sin α_3 = **−0,940**

Nous répétons le même raisonnement que ci-dessus et cherchons l'angle compris entre 0° et 90° qui représente la même valeur de fonction que l'angle donné. En consultant le dessin du cercle unitaire, nous voyons que l'angle donné se trouve dans le troisième quadrant. Nous devons donc procéder autrement pour déterminer la valeur de sa fonction. Nous soustrayons 180° de la valeur de l'angle donné et obtenons un angle ayant la même valeur de fonction dans le premier quadrant (250° – 180° = 70°). La valeur de l'angle de 70° correspond à celle de celui de 250° mais les signes ne sont toutefois pas les mêmes.

α_4 = **330°**

Marche à suivre:
- détermination du quadrant : α_4 se trouve dans le quatrième quadrant
- détermination du signe : le signe est négatif
- détermination de la valeur : sin α_4 = **−0,5**

Le cercle unitaire nous apprend que pour l'angle situé dans le quatrième quadrant le complément doit être cherché avec 360°. C'est-à-dire, dans notre exemple : 360° − 330° = 30°. L'angle de 30° présente la même valeur de fonction que celle de l'angle de 330° mais avec le signe négatif.

c. Détermination de diverses fonctions trigonométriques dans les quatre quadrants

cos de l'angle α = **150°**

Marche à suivre:
- détermination du quadrant : l'angle se trouve dans le deuxième quadrant
- détermination du signe : le signe est négatif
- détermination de la valeur cos α = **−0,866**

Le même raisonnement que pour l'exercice b est appliqué.

tg de l'angle α = **220°**

Marche à suivre:
- détermination du quadrant : l'angle se trouve dans le troisième quadrant
- détermination du signe : le signe est positif
- détermination de la valeur : tg α = **0,839**

Pour la détermination de la valeur de la fonction, les mêmes règles que pour la fonction du sinus sont valables.
La figure 43 montre comment le signe peut être estimé. La valeur de la tg est déterminée par le rapport $\overline{AB}$ sur $\overline{OA}$. Les deux droites présentent un signe négatif. Les règles de l'algèbre nous enseignent que la division d'une valeur négative par une valeur négative a comme résultat une valeur positive.

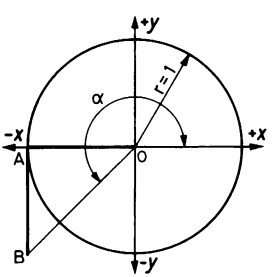


Figure 43

ctg de l'angle α = **310°**

Marche à suivre:

– détermination du quadrant : l'angle se trouve dans le quatrième quadrant
– détermination du signe : le signe est négatif
– détermination de la valeur : ctg α = **– 0,839**

La valeur de la fonction et le signe sont déterminés selon les mêmes règles que pour l'exercice précédent.

tg de l'angle α = **130°**

Marche à suivre:

– détermination du quadrant : l'angle se trouve dans le deuxième quadrant
– détermination du signe : le signe est négatif
– détermination de la valeur : tg α = **– 1,192**

5. L'essentiel

Dans la technique des courants alternatifs on travaille avec des fonctions trigonométriques (ou angulaires) pour représenter des courants et des tensions qui ont des positions de phase différentes (déphasage) et pour calculer les circuits à courant alternatif. Les fonctions trigonométriques ont pour base le triangle rectangle. Chaque fonction trigonométrique est exprimée par un rapport formé par deux des côtés du triangle.
Dans le cercle unitaire la valeur des fonctions peut directement être trouvée. La figure 44 montre le procédé graphique permettant de trouver la valeur des fonctions.

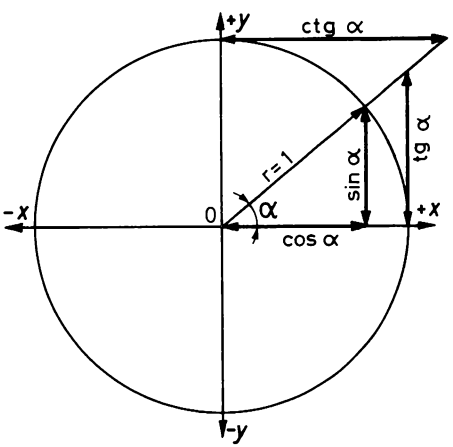


Figure 44

Les signes de la valeur des fonctions changent dans les différents quadrants. Pour calculer la valeur d'une fonction on projette l'un des deux angles droits

du triangle rectangle sur l'axe des X ou sur l'axe des Y du système des coordonnées.
La figure 45 nous en montre un exemple.

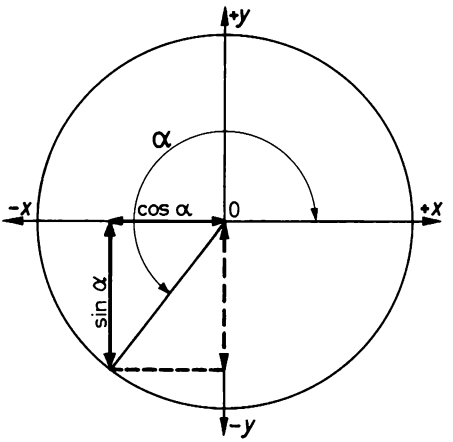


Figure 45

Les angles se mesurent en longueur d'arc (ou radian) ou en degrés. Mesurée en degrés, la circonférence en compte 360 et en mesure d'arc elle est égale à 2π.

6. Exercices de répétition (solutions page 431)

a) Déterminez par le dessin, à l'aide du cercle unitaire, les quatre fonctions trigonométriques pour les angles suivants :
$\alpha_1 = 29°$; $\alpha_2 = 127°$; $\alpha_3 = 250°$; $\alpha_4 = 310°$, (r = 8 cm)
b) Vérifiez les valeurs trouvées à l'aide d'une table ou de la règle à calcul.
c) Déterminez l'arc pour les angles suivants :
$\alpha_1 = 0°$; $\alpha_2 = 45°$; $\alpha_3 = 90°$; $\alpha_4 = 130°$; $\alpha_5 = 210°$; $\alpha_6 = 345°$
d) Trouvez l'angle en degrés, correspondant aux fonctions trigonométriques suivantes :
sin $\alpha_1 = 0{,}643$; cos $\alpha_2 = -0{,}574$; tg $\alpha_3 = 0{,}577$; ctg $\alpha_4 = 2{,}145$
e) Pourquoi l'électronicien doit-il maîtriser les fonctions trigonométriques ?
f) Pourquoi les tables trigonométriques ne sont-elles établies que pour les angles de 0° à 90° ?
g) Un circuit électrique présente un cos φ de 0,9. Quel est l'angle du déphasage correspondant ?

II. Les fonctions trigonométriques sur la règle à calcul

1. Introduction

Ce chapitre s'adresse à ceux dont l'emploi de la règle à calcul leur est familier. Le sujet présenté ici ne remplace pas un cours sur la règle à calcul, nous ne voulons nous occuper spécialement que des fonctions trigonométriques sur la règle à calcul. Celui qui ne possède pas, ou ne peut disposer d'une règle à calcul, peut sauter ce chapitre. Il est cependant conseillé à chacun de se procurer une règle à calcul – droite ou circulaire – de façon à pouvoir s'exercer au maniement de cet appareil. La règle à calcul permet d'économiser son temps et sa peine. Sans ce moyen, l'électronicien peut à peine s'en sortir.

2. Que savez-vous au sujet des fonctions trigonométriques sur la règle à calcul ? (solutions page 433)

a) Trouvez le sinus d'un angle de 25°.
b) Trouvez le cosinus d'un angle de 55°.
c) Quel est l'angle correspondant à la valeur de la tangente tg α = 0,6 ?
d) Trouvez la cotangente de 30°.
e) Quelle est la valeur du sinus d'un angle de 3° ?

3. Les fonctions trigonométriques sur la règle à calcul

a. Le sinus

Les valeurs comprises entre 5,5° et 90° peuvent se lire directement sur presque toutes les règles. En revanche, les valeurs du sinus pour les angles plus petits que 5,5° ne peuvent se lire directement sur la plupart des règles à calcul.

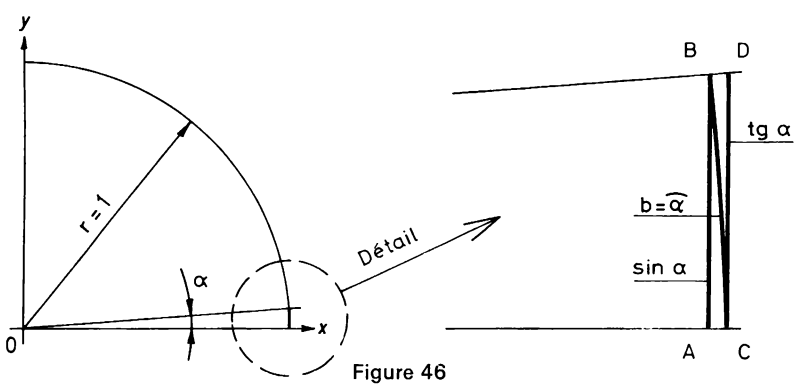


Figure 46

Une méthode simple permet cependant de calculer la valeur de ces fonctions. Au moyen de la figure 46 nous voulons développer ce procédé.
Nous examinons les deux droites $\overline{AB}$ et $\overline{CD}$ sur l'image agrandie et constatons que la différence de leurs longueurs est à peine perceptible. Plus l'angle choisi est petit plus la différence des longueurs s'amenuise. On peut en dire de même de ce qui concerne la longueur de l'arc b. Pour les petits angles nous pouvons nous permettre la simplification suivante :

Pour les angles qui sont plus petits que 7° les valeurs du sinus, de la tangente et de l'arc sont pratiquement les mêmes.

A l'aide des tables nous vérifions cet énoncé et nous comparons les valeurs, l'une par rapport à l'autre, pour un angle $\alpha° = 7°$:
$\sin \alpha° = 0{,}1219$
$\operatorname{tg} \alpha° = 0{,}1228$
$\operatorname{arc} \alpha° = 0{,}1221$ rad
Nous constatons que l'erreur la plus forte est au-dessous d'un pour-cent.
Et maintenant, pour calculer la valeur du sinus et de la tangente pour des angles plus petits que 7° nous nous permettons la simplification suivante :

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha \approx \operatorname{arc} \alpha \text{ (quand } \alpha \text{ est plus petit que } 7°)$$

Le calcul de la longueur de l'arc correspond, dans le cercle unitaire à la mesure de l'arc et donne directement comme résultat la valeur de la fonction du sinus ou de la tangente. Cette constatation mène à la formule de calcul suivante :

$$\text{pour } \alpha < 7° \text{ on a : } \operatorname{arc} \alpha = \alpha = b = \frac{2\pi}{360°} \cdot \alpha° = \frac{\pi}{180°} \cdot \alpha° \approx \sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$$

b. Le cosinus

Les valeurs entre 0° et 84,5° peuvent se lire directement sur la plupart des règles à calcul. En revanche, les valeurs du cosinus pour des angles plus grands que 84,5° ne peuvent se lire directement sur toutes les règles à calcul. La figure 47 nous montre une méthode qui permet de calculer les valeurs du cosinus pour de grands angles. Le principe de base ne se différencie pas de celui utilisé pour le calcul du sinus des petits angles.
Nous procédons aux mêmes raisonnements et effectuons les mêmes simplifications.
La droite $\overline{OA}$ dans le cercle unitaire correspond à la valeur de la fonction du cosinus. Dans l'image agrandie, la droite $\overline{GH}$ est approchant de même longueur que $\overline{OA}$, par conséquent elle représente également la valeur de la fonction du cosinus. $\overline{EF}$ correspond à la cotangente. Pour les grands angles nous pouvons simplifier ainsi :

$$\overline{GH} \approx \overline{EF} \approx 90° - \alpha \sim \cos \alpha \approx \operatorname{ctg} \alpha \text{ (pour des angles entre } 83° \text{ et } 90°)$$

Afin de pouvoir calculer les fonctions du cosinus et de la cotangente pour des angles entre 83° et 90°, il nous suffit, d'après la méthode déjà utilisée

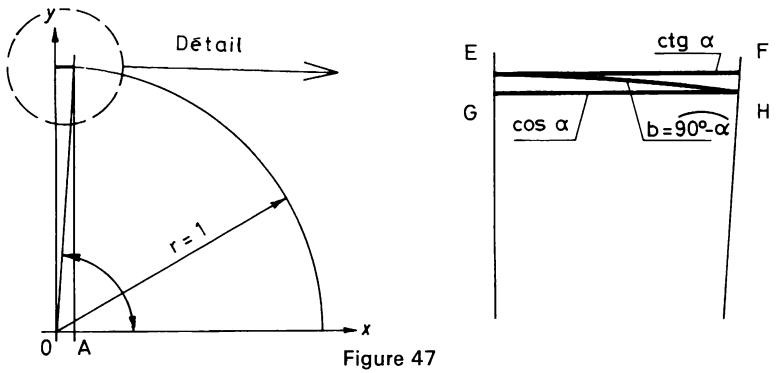


Figure 47

pour le calcul du sinus des petits angles, de déterminer la longueur de l'arc dans le cercle unitaire pour l'angle α.

$$\cos \alpha = \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot (90^\circ - \alpha^\circ)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot (90^\circ - \alpha^\circ)$$

Les bonnes règles à calcul donnent la mesure des arcs pour les angles compris entre 0,55° (33'') et 6°. Le plus souvent l'angle est indiqué en unité d'arc. Au moyen de cette échelle, on peut lire directement les valeurs du sinus et de la tangente pour les angles plus grands que 84° puisque pour ces angles dans le cercle unitaire, l'arc est égal à la valeur des fonctions trigonométriques.

c. La tangente

La plupart du temps, la fonction de la tangente est donnée sur une échelle pour les angles de 5,5° à 45°.

Certaines règles à calcul spéciales disposent en plus d'une échelle des tangentes pour les angles de 45° à 84,5°; toutefois, nous allons constater sans tarder que cette échelle est superflue. Nous venons de parler de la manière de calculer la tangente des angles plus petits que 5,5°. Mais alors comment la valeur de la tangente est-elle trouvée pour des angles plus grands que 45°? Nous savons que la fonction de la tangente représente l'inverse de la fonction de la cotangente et si la règle à calcul possède une échelle pour le calcul de la cotangente des angles compris entre 45° et 84,5° nous n'aurons pas beaucoup de peine à calculer les valeurs de la tangente pour les angles plus grands que 45°. Nous cherchons la valeur de la cotangente correspondante et calculons sa valeur réciproque. Comme la plupart des règles à calcul possèdent une échelle des valeurs réciproques, il est possible de lire directement la tangente cherchée car:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha}$$

d. La cotangente

La fonction de la cotangente pour des angles compris entre 5,5° et 45° est également calculée selon la méthode dont nous venons de parler. Nous cherchons la valeur de la tangente de l'angle en question et nous obtenons la valeur de la cotangente en formant l'inverse de la valeur trouvée pour la tangente car :

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}$$

e. L'échelle $\sqrt{1-x^2}$

La plupart des règles à calcul possèdent une échelle portant la désignation $\sqrt{1 - x^2}$. Nous allons étudier les possibilités de cette échelle grâce à l'aide du cercle unitaire. La figure 48 nous montre les rapports dans le cercle unitaire.

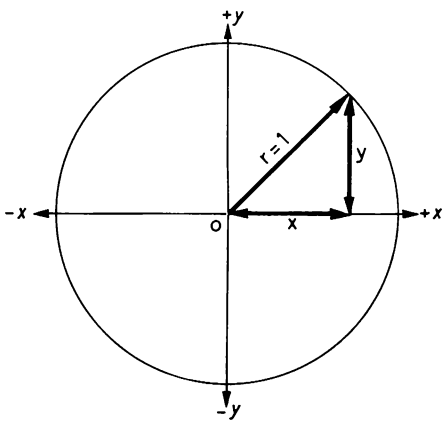


Figure 48

Le théorème de Pythagore nous permet d'écrire :

$$1 = \sqrt{x^2 + y^2};\ y^2 = 1 - x^2;\ y = \sqrt{1 - x^2} \text{ et}$$
$$x^2 = 1 - y^2;\ x = \sqrt{1 - y^2}$$

Cette échelle très utile, nous permet ainsi de lire simultanément la fonction du cosinus pour chaque fonction du sinus pour un même angle et vice versa. Il nous suffit maintenant de remplacer les valeurs de x et y par celles du cos et du sin pour constater aussitôt que les deux fonctions sont interchangeables.

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$$
$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$$

Nous utilisons ce fait lorsque nous voulons calculer les valeurs du sinus pour de grands angles ou celles du cosinus pour de petits angles avec une précision suffisante.

Sur la règle à calcul ces échelles se resserrent à leur extrémité droite, donc la visibilité en souffre. Par l'emploi de l'échelle $\sqrt{1 - x^2}$ la lecture s'effectue sur la partie gauche de la règle où la lisibilité est meilleure.

4. Exemples

a) Chercher le sin de l'angle α = **40°**
Marche à suivre:
Sur l'échelle des sinus, le curseur est placé sur 40°, sur l'échelle des x, vous pouvez lire directement la valeur de la fonction.

$$\sin \alpha = \mathbf{0{,}643}$$

b) Chercher le sin de l'angle α = **3°**
Marche à suivre:

– écrire la formule pour les petits angles $\sin \alpha \approx \frac{2\pi}{360°} \cdot \alpha°$

Introduire les valeurs: $\sin \alpha \approx \frac{6{,}28}{360°} \cdot 3°$

$$\sin \alpha \approx \mathbf{0{,}0524}$$

Marche à suivre pour les règles à calcul munies de l'échelle des arcs:
Sur l'échelle des arcs, placer le curseur sur 3°, sur l'échelle des x la valeur de la fonction est directement lisisble.

c) Chercher le sin de l'angle α = **82°**
Marche à suivre:
Placer le curseur sur 82° de l'échelle des sinus, lire la valeur directement sur l'échelle des x.

$$\sin \alpha = \mathbf{0{,}99}$$

Marche à suivre pour les règles à calcul munies de l'échelle $\sqrt{1 - x^2}$
Placer le curseur de l'échelle des cosinus sur 82°, lire la valeur de la fonction sur l'échelle $\sqrt{1 - x^2}$.

$$\sin \alpha = \mathbf{0{,}9903}$$

Ce procédé donne un résultat plus précis.

d) Chercher le cos de l'angle α = **75°**
Marche à suivre:
Placer le curseur sur 75° de l'échelle des cosinus, lire le résultat sur l'échelle des x.

$$\cos \alpha = \mathbf{0{,}259}$$

e) Chercher le cos de l'angle $\alpha = \mathbf{86°}$
Marche à suivre:

– écrire la formule pour les grands angles $\cos \alpha \approx \frac{2\pi}{360°} \cdot (90° - \alpha)$

– introduire les valeurs et calculer $\cos \alpha \approx \frac{6{,}28}{360°} \cdot 4°$

$\cos \alpha \approx \mathbf{0{,}07}$

Marche à suivre pour les règles à calcul munies de l'échelle des arcs:
– déterminer l'angle $\cos \alpha = \sin (90° - \alpha)$
$\cos 86° = \sin 4°$

Placer le curseur sur 4° de l'échelle des arcs et lire directement la fonction sur l'échelle des x.

$\cos \alpha = \mathbf{0{,}07}$

f) Chercher le cosinus de l'angle $\alpha = \mathbf{12°}$
Marche à suivre:
Placer le curseur sur 12° de l'échelle des cosinus et lire la valeur de la fonction sur l'échelle des x.

$\cos \alpha = \mathbf{0{,}978}$

Marche à suivre pour les règles à calcul munies de l'échelle $\sqrt{1 - x^2}$*:*
Placer le curseur sur 12° de l'échelle des sinus, lire le résultat sur l'échelle $\sqrt{1 - x^2}$.

$\cos \alpha = \mathbf{0{,}9781}$

Grâce à l'échelle $\sqrt{1 - x^2}$ le résultat est très précis.

g) Chercher la tg de l'angle $\alpha = \mathbf{35°}$
Marche à suivre:
Placer le curseur sur 35° de l'échelle des tangentes et lire la valeur sur l'échelle des x.

$\operatorname{tg} \alpha = \mathbf{0{,}7}$

h) Chercher la tg de l'angle $\alpha = \mathbf{2°}$
Marche à suivre:
Même procédé que pour l'exercice b) car pour de si petits angles
$\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha \approx b$

$\operatorname{tg} \alpha \approx \mathbf{0{,}0349}$

i) Chercher la tg de l'angle $\alpha = \mathbf{68°}$
Marche à suivre:
Placer le curseur sur 68° de l'échelle des cotangentes ou sur 22° de l'échelle des tangentes, lire la valeur de la fonction sur l'échelle 1/x.

$\operatorname{tg} \alpha = \mathbf{2{,}475}$

k) Chercher la tg de l'angle α = **88°**

Marche à suivre:
Trouver la ctg de 88° d'après la méthode de l'exercice e) car pour de si grands angles

$\cos \alpha \approx \text{ctg } \alpha$
$\text{ctg } \alpha \approx$ **0,0349**

Lire la valeur de la tg sur l'échelle 1/x.

$\text{tg } \alpha \approx$ **28,6**

l) Chercher la ctg de l'angle α = **70°**

Marche à suivre:
Placer le curseur sur 70° de l'échelle des cotangentes ou sur 20° de l'échelle des tangentes. Lire le résultat sur l'échelle des x.

$\text{ctg } \alpha =$ **0,364**

m) Chercher la ctg de l'angle α = **87°**

Marche à suivre:
Même procédé que pour l'exercice e) car pour de si grands angles $\cos \alpha \approx \text{ctg} \alpha$

$\text{ctg } \alpha =$ **0,0524**

n) Chercher la ctg de l'angle α = **28°**

Marche à suivre:
Placer le curseur sur 28° de l'échelle des tangentes, lire la valeur de la fonction sur l'échelle 1/x.

$\text{ctg } \alpha =$ **1,88**

o) Chercher la ctg de l'angle α = **1,5°**

Marche à suivre:
Déterminer la valeur de tg α selon l'exercice h)

$\text{tg } \alpha \approx 0{,}0262$

Valeur de la fonction pour tg α lue sur l'échelle 1/x.

$\text{ctg } \alpha \approx$ **38,19**

5. L'essentiel

Le maniement d'une règle à calcul pour déterminer les fonctions trigonométriques de tous les angles présuppose la connaissance parfaite des rapports dans le cercle unitaire.

Les fonctions du sinus et du cosinus peuvent se lire directement, à l'exception des petits angles pour les fonctions du sinus et des angles voisins de 90° pour les fonctions du cosinus.
Les fonctions du sinus et de la tangente pour les petits angles et celles du cosinus et de la cotangente pour les grands angles se calculent à l'aide des mesures de l'arc car dans ces zones, la longueur de l'arc correspond pratiquement aux valeurs trigonométriques cherchées. Les opérations relatives aux petits angles sont particulièrement facilitées lorsque la règle à calcul est munie d'une échelle des arcs.
L'échelle $\sqrt{1 - x^2}$ permet une précision de lecture accrue des valeurs de la fonction du sinus et du cosinus lorsque celles-ci se présentent normalement sur la partie droite des échelles. Cette échelle est précieuse car vers l'extrémité droite de la règle, la précision de lecture diminue fortement.
Les échelles pour les fonctions de la tangente et de la cotangente se complètent l'une l'autre. Les fonctions de la tangente pour des angles jusqu'à 45° et dès cette valeur pour les fonctions de la cotangente sont directement lisibles. Puisque la fonction de la tangente peut se calculer en formant la valeur réciproque de la fonction de la cotangente les valeurs de la tangente pour des angles plus grands que 45° peuvent se lire sur l'échelle 1/x, à condition que la règle possède la fonction de la cotangente pour la valeur de l'angle considéré, permettant le calcul de la fonction de la tangente et inversement.

6. Exercices de répétition (solutions page 433)

La résolution de tous les problèmes s'effectue avec la règle à calcul.

a) Calculez le sinus d'un angle de 2,6° = 2° 36′.
b) Calculez le cosinus d'un angle de 11,7° = 11° 42′ avec la plus grande précision possible.
c) Quelle est la valeur de la cotangente d'un angle de 86,8° = 86° 48′?
d) Calculez la tangente d'un angle de 67°.
e) Expliquez les avantages de l'échelle $\sqrt{1 - x^2}$.
f) Quels sont les avantages offerts par l'échelle des arcs (∢-arc)?
g) Quelle est la simplification possible grâce à l'échelle 1/x?
h) Comment calculez-vous la fonction du sinus pour des angles plus petits que 6° lorsque la règle à calcul ne possède pas d'échelle des arcs?

E. Courants alternatifs

I. Le courant alternatif monophasé

1. Introduction

La technique du courant alternatif joue un rôle prédominant en électronique. Dans tous les appareils de la technique des télécommunications, des fonctions importantes incombent aux courants alternatifs. Il n'existe pratiquement aucun appareil de transmission dans lequel des courants alternatifs ou des tensions alternatives ne soient, sous une forme ou une autre, produits, amplifiés ou traités. Le chapitre suivant nous donne les bases concernant les courants alternatifs et les tensions alternatives.

2. Que savez-vous au sujet des courants alternatifs ? (solutions page 435)

a) Qu'entendez-vous par courant alternatif ?
b) Quelle est la forme de la courbe produite par le courant alternatif industriel ?
c) Une tension alternative a une fréquence de 50 hertz ; que signifie le terme 50 hertz pour cette tension alternative ?
d) Un courant alternatif de haute fréquence a une longueur d'onde de 30 m ; pouvez-vous vous représenter quelque chose à ce sujet ?
e) Nommez deux domaines d'utilisation de courants alternatifs.
f) Quelle sorte de tension est nécessaire au fonctionnement d'un haut-parleur ?

3. Le courant alternatif

a. La notion du courant alternatif

Le courant alternatif change périodiquement son sens et sa force. Les courants alternatifs de forme sinusoïdale suivent le cours d'une fonction du sinus, ils changent de sens et de force conformément au tracé de cette fonction. Des courants alternatifs qui ne sont pas de forme sinusoïdale existent également. Dans la technique des télécommunications nous rencontrerons souvent des courants alternatifs qui présentent une toute autre forme.

b. La production du courant alternatif sinusoïdal

Les courants alternatifs industriels sont de forme sinusoïdale. Ils sont produits par des générateurs. Le générateur fonctionne selon le principe de l'induction. Dans un générateur, une spire conductrice en forme de boucle, tourne avec une vitesse constante dans un champ magnétique homogène.

Le conducteur se déplace en suivant une circonférence. Le nombre des lignes de force coupées par le conducteur dépend de sa position. La tension induite est proportionnelle au nombre de lignes de force coupées. D'après la figure 49 nous voyons que la tension induite doit suivre la fonction du sinus car à 90° et à 270° le plus grand nombre de lignes de force est coupé alors qu'à 0° et 180° les lignes de force sont seulement touchées. La tension alternative produite atteint sa valeur maximale à 90° et 270° et, au contraire, elle est nulle à 0° et 180°. Il ressort de là que la tension change de sens à 0° et 180°.

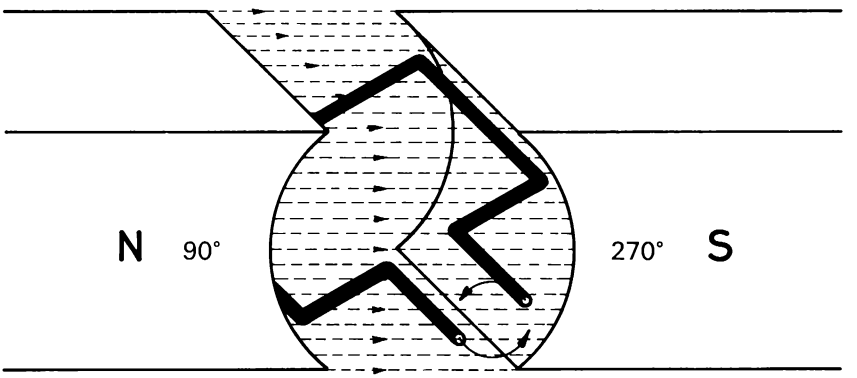


Figure 49

La figure 50 nous montre la tension alternative induite trouvée par le dessin. Celle-ci apparaît, par rapport au sens et à la grandeur, comme une fonction du sinus de l'angle de rotation.

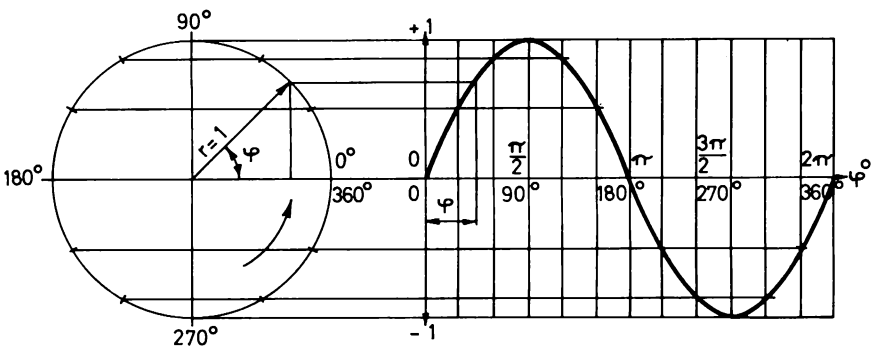


Figure 50

c. Caractéristiques des courants et tensions alternatifs

La figure 51 montre un train d'ondes d'une tension alternative sinusoïdale avec ses principales caractéristiques.

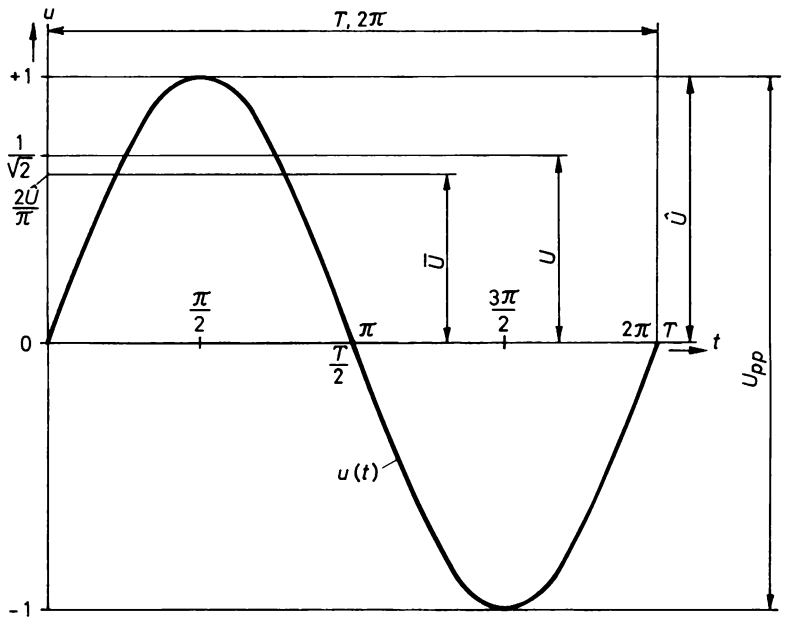


Figure 51

La fréquence du courant alternatif

La *fréquence* d'un courant alternatif correspond au nombre d'oscillations par seconde. La tension alternative du réseau-lumière change sa grandeur et son sens 100 fois par seconde. Le train d'ondes, selon la figure 51 apparaît 50 fois en une seconde, la tension possède une fréquence de 50 hertz.

L'unité de base déterminant la fréquence est le *hertz*. $1\ \text{Hz} = 1\,\frac{1}{\text{s}} = 1\ \text{s}^{-1}$

Dans les formules on utilise le symbole *f* pour indiquer la fréquence.

Dans la pratique, la gamme des fréquences utilisée est très grande. Pour désigner de plus hautes fréquences on emploie, pour cette raison, de plus grandes unités.

1 kilohertz kHz $= 10^3$ Hz
1 mégahertz MHz $= 10^6$ Hz
1 gigahertz GHz $= 10^9$ Hz

Dans la technique des télécommunications les *gammes de fréquences* suivantes sont occupées :

Fréquences sonores	16 Hz	à	18 kHz				
Ultrasons	18 kHz	à	30 kHz				
Ondes longues	30 kHz	à	300 kHz	OL	(long.	10 km ...	1 km)
Ondes moyennes	300 kHz	à	3 MHz	OM	(long.	1 km ...	100 m)
Ondes courtes	3 MHz	à	30 MHz	OC	(long.	100 m ...	10 m)
Ondes ultracourtes	30 MHz	à	300 MHz	OUC	(long.	10 m ...	1 m)
Ondes décimétriques	300 MHz	à	3 GHz	UHF	(long.	1 m ...	1 dm)
Ondes centimétriques	3 GHz	à	30 GHz	SHF	(long.	1 dm ...	1 cm)

Ces gammes de fréquences sont principalement utilisées par les services suivants :

Ondes longues (OL)	Trafic entre stations fixes et radiophonie (ou radiodiffusion)
Ondes moyennes (OM)	Trafic entre stations fixes, radiophonie, trafic radio des bateaux et de la police
Ondes courtes (OC)	Radiophonie pour grandes distances, stations côtières, stations pour l'aviation, stations d'amateurs, générateurs à usage médical, générateurs HF pour l'industrie, télécommandes
Ondes ultracourtes (OUC)	Radiodiffusion à modulation de fréquence, stations maritimes côtières, stations de navires, télévision, navigation aérienne
Ondes décimétriques (UHF)	Télévision, navigation aérienne, faisceaux hertziens (à ondes dirigées)
Ondes centimétriques (SHF)	Aides à la navigation, radar

La pulsation (fréquence angulaire) ou vitesse angulaire

Le produit de la fréquence *f* par la circonférence du cercle 2π s'appelle la *pulsation*. La production d'une oscillation sinusoïdale de fréquence *f* peut s'interpréter par la projection d'un vecteur tournant avec la vitesse angulaire $\omega = 2\pi f$.

La pulsation possède la même unité de base que celle de la fréquence car l'expression 2π représente une constante sans dimension.

Le symbole de la pulsation est désigné par la lettre grecque petit oméga : ω.

La pulsation est une grandeur très importante pour le calcul des circuits à courant alternatif.

La durée d'une oscillation ou période

La *durée d'une période* est le temps nécessaire pour qu'une oscillation périodique recommence le cycle de son oscillation. Pour une oscillation sinusoïdale cela correspond à la durée d'une période.

L'unité de base pour la durée de l'oscillation ou période est la seconde s. Dans les formules le symbole T est utilisé pour la durée d'une oscillation

(période). La période correspond à la valeur réciproque de la fréquence.

$$T = \frac{1}{f}\,[s]$$

L'amplitude
La plus grande déviation de la courbe du sinus s'appelle l'*amplitude*.

La vitesse de propagation
Les oscillations électriques se propagent dans l'espace avec la *vitesse de la lumière*. Par conséquent, la *vitesse de propagation* est de 300 000 km/s. Dans les conducteurs électriques et les câbles blindés, la vitesse de propagation des oscillations électriques est toujours plus faible que celle de la lumière. L'unité de mesure de la vitesse de propagation est le m/s.
Dans les formules, la vitesse de propagation est désignée par la lettre c. Pour la vitesse de la lumière la lettre c_o est utilisée.

La longueur d'onde
La longueur d'onde est le résultat du quotient de la vitesse de propagation par la fréquence. Par conséquent, dans l'espace, la longueur d'onde se calcule comme suit :

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad [\lambda] = \frac{m \cdot s}{s} = m$$

L'unité de base de la longueur d'onde est le mètre (m).
Dans les formules exprimant la longueur d'onde le symbole λ est utilisé. Le symbole de la valeur momentanée est désigné par *i* ou *u*.

La valeur maximale
La *valeur maximale* d'une tension ou d'un courant correspond à l'amplitude. Elle est souvent nommée *valeur de pointe* ou *valeur de crête.*
Le symbole de la valeur de pointe est $\hat{U}$ ou $\hat{I}$.

La valeur efficace
La *valeur efficace* d'un courant alternatif correspond à celle d'un courant continu qui produirait la même puissance. Pour obtenir la valeur efficace d'une tension alternative sinusoïdale il faut diviser la valeur maximale par racine de 2.

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

Les symboles utilisés sont U ou I.

Cette formule n'est valable que pour les courants et les tensions de forme sinusoïdale, elle ne permet pas de calculer des grandeurs alternatives de forme différente. Le facteur de conversion pour la valeur effective peut s'expliquer en utilisant la courbe de puissance. Pour simplifier notre raisonnement, nous examinons les rapports dans un circuit à courant alternatif dont l'utilisateur ohmique présente la valeur d'un ohm. Selon la loi d'Ohm nous pouvons dire que la puissance utilisée est égale au carré du courant ou de la tension. La deuxième simplification consiste à appliquer une tension alternative sinusoïdale ayant une valeur maximale de 1 volt. La figure 52 montre le circuit de mesure.

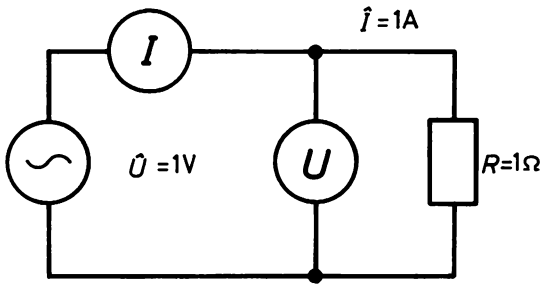


Figure 52

Par conséquent, un courant maximal de 1 ampère s'écoule dans le circuit de mesure. Pour pouvoir déterminer la puissance utilisée à un instant quelconque nous avons retenu la valeur de la tension à ce moment-là et l'élevons au carré car la formule de la puissance donne :

$$p = i^2 \cdot R \text{ ou } p = \frac{u^2}{R}$$

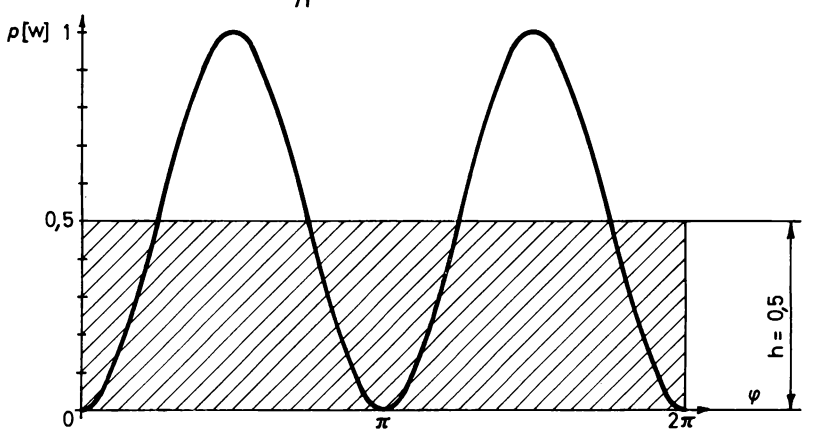


Figure 53

Puisque, dans notre exemple nous avons choisi un ohm pour la valeur de la résistance, la formule se simplifie encore :

$$p = i^2 \text{ ou } p = u^2$$

Ainsi, nous n'utilisons que la valeur du courant ou de la tension au carré pour déterminer la puissance transformée en chaleur à un instant donné. Le résultat d'une telle courbe de puissance pendant une période est visible sur la figure 53. La courbe de puissance ne présente que des valeurs positives car le carré d'un nombre est indépendant du signe qui précède ce nombre.

Déduction : $p = \frac{u^2}{R}$; simplification : $R = 1$, donc $p = u^2$

Puisque la courbe pour $u^2 = {}^2\hat{U}\sin^2\varphi$ est également une courbe symétrique, il s'ensuit que :

$P = \frac{\hat{P}}{2}$; de là $U = \sqrt{P} = \sqrt{\frac{\hat{P}}{2}}$. Là, si $R = 1$, $\sqrt{\hat{P}} = \hat{U}$ par conséquent $U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$

Le rectangle hachuré est de surface égale à celle comprise à l'intérieur de la courbe de puissance. La hauteur du rectangle correspond à la puissance moyenne. A l'aide des mathématiques supérieures, on peut prouver que la hauteur du rectangle, de surface équivalente à celle délimitée par la courbe de puissance, est exactement la demi-hauteur de la valeur de pointe de cette courbe. Pour calculer la tension, nous devons extraire la racine de la puissance ce qui signifie, dans notre exemple, que la tension effective est de $\sqrt{2}$ fois plus petite que la tension de pointe. La figure 53 montre le développement de la formule. Par contre, la preuve que la hauteur du rectangle hachuré est égale à la demi-hauteur de la valeur de la puissance de pointe n'est pas faite, car elle ne peut être apportée que par l'emploi du calcul intégral.

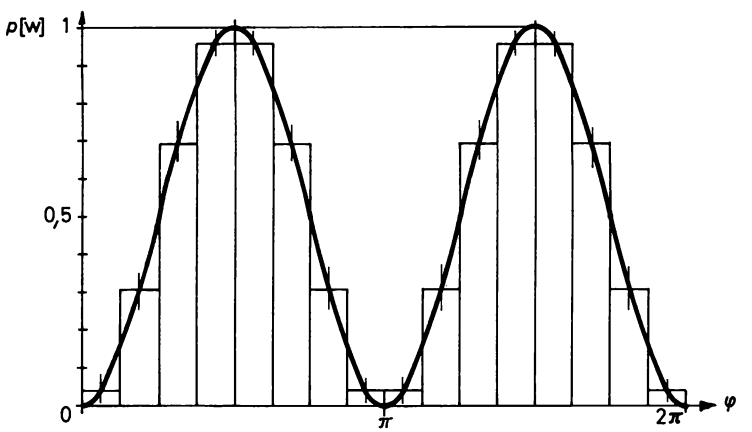


Figure 54

Mais nous pouvons aussi prouver approximativement cette supposition au moyen d'un dessin sur lequel la surface circonscrite par la courbe de puissance est divisée en étroits rectangles. En faisant la somme de la surface de chacun de ces rectangles on obtient la surface totale.
La figure 54 nous montre la méthode graphique qui permet de trouver la surface de la courbe de puissance.

La valeur moyenne

La valeur moyenne d'un courant alternatif correspond à celle d'un courant continu qui transporte le même nombre d'électrons, par unité de temps, à travers une section de conducteur. Si le courant alternatif est symétrique, sa valeur moyenne est nulle puisque les demi-ondes (alternances) positives et négatives s'annulent. La valeur moyenne ne se manifeste qu'après un redressement. Par conséquent elle joue un rôle en galvanotechnique et dans la technique des mesures. Un instrument à cadre mobile, dont l'aiguille dévie proportionnellement au courant, indique la valeur moyenne du courant redressé précédemment. Mais normalement, comme des valeurs effectives doivent être mesurées l'échelle est étalonnée en ces valeurs-là tout en perdant la linéarité qu'elle possède en courant continu. Pour calculer la valeur moyenne d'un courant alternatif ou d'une tension de forme sinusoïdale, il faut multiplier la valeur maximale par le facteur deux et diviser le résultat par π.

$$\overline{U} = \frac{2 \cdot \hat{U}}{\pi} = 0{,}636 \cdot \hat{U}$$

Les symboles utilisés dans les formules sont $\overline{U}$ ou $\overline{I}$.
Cette formule n'est valable que pour les courants et les tensions de forme sinusoïdale. Des grandeurs alternatives ayant d'autres formes de courbe ne peuvent pas être calculées de cette façon.

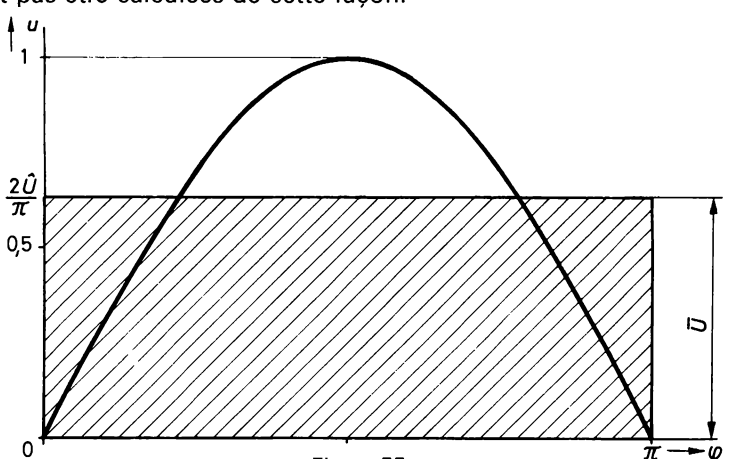


Figure 55

Le facteur de conversion pour le calcul de la valeur moyenne peut s'expliquer à l'aide de la courbe du sinus. Ici, la valeur moyenne est équivalente à un courant continu (constant) et la surface circonscrite par la courbe du sinus est égale à la charge écoulée (nous nous souvenons, charge = courant fois le temps), donc la hauteur du rectangle équivalent est égale à la valeur moyenne du courant. La figure 55 nous montre ces rapports. Le calcul intégral donne pour la fonction du sinus une hauteur du rectangle correspondant égale à $2/\pi$ fois la valeur maximale. Cette assertion peut être facilement vérifiée par la méthode graphique.

La valeur instantanée

La valeur instantanée d'une tension ou d'un courant est celle qui est subordonnée à un instant quelconque. Pour les tensions ou les courants de forme sinusoïdale, la valeur instantanée se calcule facilement :

$$u = \hat{U} \cdot \sin \alpha$$

Si l'angle α est donné en unité d'arc, la formule se présente comme suit :

$$u = \hat{U} \sin (\omega t)$$

Cette façon d'écrire est la plus courante, car la valeur instantanée peut être calculée pour n'importe quel instant, lorsque le temps et la pulsation sont connus.
Les symboles utilisées sont u ou i.

La valeur pointe à pointe

La *valeur pointe à pointe* correspond au double de la valeur maximale.

$$U_{pp} = 2\,\hat{U}$$

Les symboles utilisés sont U_{pp} et I_{pp}.
La valeur pointe à pointe joue un rôle dans la technique de l'amplification car, là, les valeurs extrêmes d'une tension ou d'un courant nous intéressent.

Harmoniques

Les *harmoniques* sont des multiples entiers d'une onde fondamentale. Les harmoniques sont toujours présents lorsque des tensions ou des courants alternatifs n'ont pas la forme d'une sinusoïde. La différence entre *onde supérieure* et *harmonique* réside seulement dans la méthode de comptage. Prenons par exemple une fréquence de base de 500 Hz ; 1500 Hz correspond à la deuxième onde supérieure mais c'est en revanche le troisième harmonique, car dans ce cas, on désigne la fréquence de base comme premier harmonique.
Les mathématiques supérieures donnent la preuve que chaque tension alternative non sinusoïdale de fréquence f, se compose des tensions partielles dont les fréquences sont $2f$, $3f$, $4f$, etc.

La figure 56 nous montre la formation d'une oscillation périodique non sinusoïdale par la composition d'une fréquence de base d'amplitude de 4 V, d'un deuxième harmonique d'amplitude de 3 V et d'un quatrième harmonique de 2 V d'amplitude. La représentation graphique permet de toute manière la construction de l'oscillation résultante lorsque la phase et l'amplitude des harmoniques sont donnés. Dans ce cas, il suffit simplement d'additionner les valeurs momentanées de tous les harmoniques.
Inversement il est très difficile de déterminer les harmoniques à partir d'une oscillation non sinusoïdale. Cependant, il arrive souvent que l'électronicien se trouve dans la situation où il doive analyser une oscillation non sinusoïdale visible sur un oscilloscope. Il faut beaucoup d'expérience, lors de l'examen d'une telle courbe, pour pouvoir déterminer de quels harmoniques elle se compose. Les mathématiques supérieures, au moyen de l'analyse de Fourier, nous permettent de décomposer une oscillation en ses harmoniques. Le praticien ne doit pas maîtriser cette méthode, cependant il doit savoir que cette possibilité d'analyse existe. De même, il existe également des appareils de mesure spéciaux qui permettent de décomposer une *oscillation de forme compliquée* en ses composants de base grâce à l'emploi de filtres très sélectifs. En revanche, dans ce cas, les différences de phase entre les courbes simples ne sont pas mesurables.

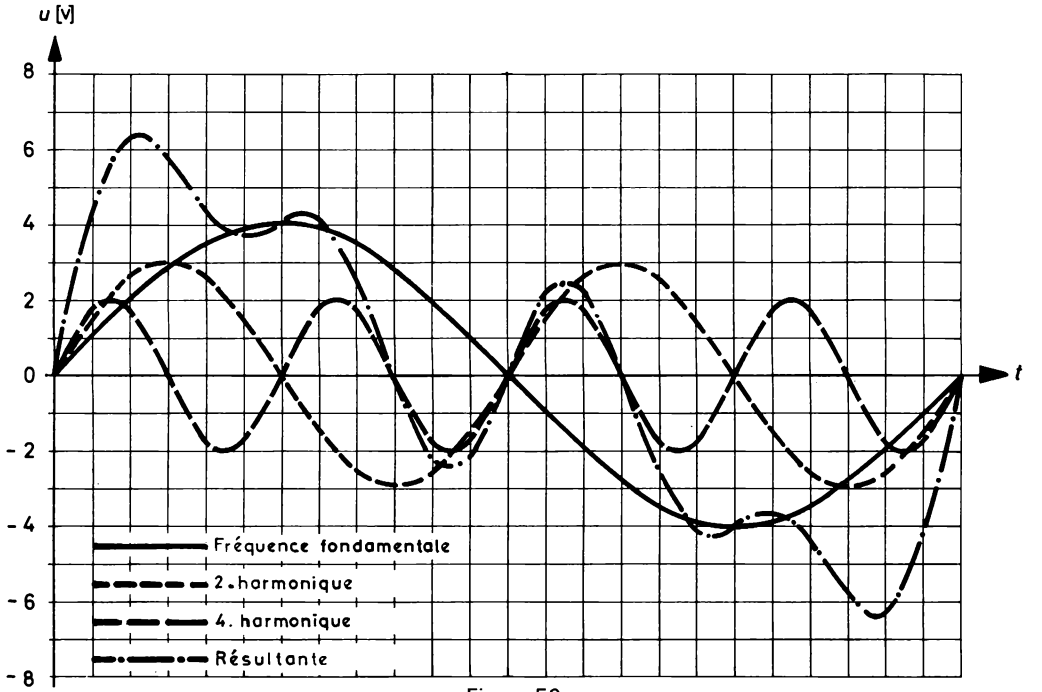


Figure 56

La tension de forme rectangulaire

Le *signal rectangulaire* est un cas particulier de tension alternative non sinusoïdale. Les signaux rectangulaires se rencontrent souvent dans la technique des impulsions. La tension d'un signal rectangulaire contient un nombre infiniment grand d'harmoniques impairs. La figure 57 nous montre la tension d'un tel signal.

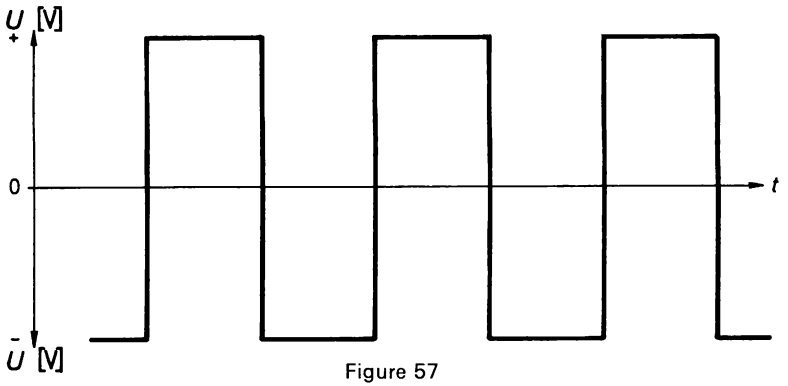


Figure 57

Dans une tension rectangulaire idéale (dite aussi : tension en crénaux) le saut de tension d'un sens à l'autre s'effectue sans retard dans le temps. Ce fait signifie qu'une quantité infinie de hautes fréquences est contenue dans une tension rectangulaire. Dans la pratique, le saut n'a pas lieu sans perte de temps, cela en nécessite tout de même un peu (ordre de grandeur : 0,1 μ_s). Les tensions rectangulaires sont utilisées dans la technique des mesures pour la vérification des appareils de transmission.

4. Exemples

a. Calcul de la fréquence d'une tension alternative

La période d'une tension alternative est de 2 microsecondes. Calculez sa fréquence, sa longueur d'onde et sa pulsation.

Marche à suivre:

– écrire la formule de la période $T = \frac{1}{f}$

– extraire f de la formule $f = \frac{1}{T}$

– introduire les valeurs et calculer $f = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6}}\,[f] = \frac{1}{\text{s}}\,\text{s}^{-1} = \text{Hz}$

$f = \mathbf{500}\ \text{kHz}$

– écrire la formule de la longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f}$

– introduire les valeurs et calculer $\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^5}\ [\lambda] = \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{s}$

$\lambda = \mathbf{600}\ \text{M}$

– écrire la formule de la pulsation $\omega = 2\,\pi\,f$

$\omega = 2\,\pi \cdot 0{,}5 \cdot 10^6$

$\omega = \mathbf{3{,}14 \cdot 10^6}\ \text{s}^{-1}$

b. Calcul de la valeur moyenne et de la valeur effective

L'amplitude d'une tension alternative est de 2,7 V. Calculez la valeur moyenne et effective de cette tension.

Marche à suivre:

– écrire la formule de la valeur moyenne $\overline{U} = \frac{\hat{U} \cdot 2}{\pi}$

– introduire les valeurs et calculer $\overline{U} = \frac{2 \cdot 2{,}7}{3{,}14}\ \text{V}$

$\overline{U} = \mathbf{1{,}72\ V}$

– écrire la formule de la valeur effective $U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$

– introduire les valeurs et calculer $U = \frac{2{,}7}{1{,}414}\ \text{V}$

$U = \mathbf{1{,}91\ V}$

c. Quelle est la valeur de la tension pointe à pointe de « b » ?

Marche à suivre:

– écrire la formule de la valeur pointe à pointe $U_{pp} = 2 \cdot \hat{U}$

– introduire les valeurs et calculer $U_{pp} = 2 \cdot 2{,}7\ \text{V}$

$U_{pp} = \mathbf{5{,}4\ V}$

d. Calcul de la valeur instantanée

Une tension alternative, dont la fréquence est de 2 MHz, passe de la polarité négative à celle positive au temps t = o. Son amplitude est de 6 V. Quelle est la grandeur de la valeur instantanée après t = ⅓ de microseconde ?

Marche à suivre:

– écrire la formule de la valeur instantanée $u = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$

– introduire les valeurs et calculer $u = 6 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot 2 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6}\right) \text{ V} \cdot \frac{\text{s}}{\text{s}}$

$$u = 6 \cdot \sin\left(\frac{4}{3}\pi\right)$$

$$u = 6 \cdot \sin 240°$$

$$u = 6 \cdot (-0{,}867)$$

$$u = \mathbf{-5{,}2\ V}$$

5. L'essentiel

Les courants et les tensions alternatifs suivent le plus souvent le tracé d'une sinusoïde. Des oscillations périodiques non sinusoïdales peuvent se décomposer en harmoniques sinusoïdaux.

La fréquence d'un courant alternatif correspond au nombre d'oscillations par seconde. La pulsation résulte du produit du facteur « 2π » par la fréquence. C'est une grandeur importante pour le calcul des circuits à courants alternatifs.

La durée d'oscillation est la durée d'une période.

L'amplitude d'une oscillation correspond à sa plus grande déviation.

La longeur d'onde, la vitesse de propagation et la fréquence sont liées par une relation étroite. La longueur d'onde est le quotient de la vitesse de propagation par la fréquence.

La valeur maximale ou la valeur de pointe d'un courant correspond à l'amplitude. La valeur effective correspond à celle d'un courant ou d'une tension continus qui produiraient la même puissance dans une résistance ohmique. Pour un tracé sinusoïdal de la courbe, la valeur effective correspond au quotient de la valeur de pointe par le facteur $\sqrt{2} = 1{,}414$.

La valeur moyenne d'un courant correspond en grandeur à celle d'un courant continu qui transporte le même nombre d'électrons par unité de temps à travers un conducteur. Pour un courant sinusoïdal, la valeur moyenne se calcule en multipliant la valeur de pointe par le facteur 0,636.

La valeur instantanée d'une tension ou d'un courant est celle qui est subordonnée à un moment quelconque. Elle peut se calculer au moyen de la fonction du sinus.

La valeur pointe à pointe correspond au double de la valeur maximale.

6. Exercices de répétition (solutions page 436)

a) Qu'entendez-vous par le terme de « pulsation ou fréquence angulaire » ?

b) Quelle est la vitesse de propagation des ondes électriques dans l'espace ?

c) La longueur d'onde d'une oscillation haute fréquence mesure 41 m. Quelle est la fréquence de cette oscillation ?

d) Dessinez une oscillation complète (période) d'une tension alternative ayant une fréquence de 2 kHz. L'amplitude est de 4,7 V. Choisissez les unités suivantes pour les axes :
axes des X (ms et rad), axe des Y (V). Inscrivez les valeurs suivantes :
- Durée de l'oscillation ou période.
- Valeur maximale de la tension.
- Valeur effective de la tension.
- Valeur moyenne arithmétique de la tension.
- Valeur instantanée de la tension pour un angle de $\pi/3$ (60°).
- Valeur pointe à pointe de la tension.

e) Une tension alternative est appliquée à une résistance ohmique de 0,5 ohm. L'amplitude de la tension alternative est de 2 V. Dessinez les courbes du courant et de la tension et d'après cela trouvez la courbe de la puissance. Calculez la puissance moyenne (valeur effective) et reportez cette valeur sur le graphique.

f) Le neuvième harmonique d'une fréquence est de 2,7 MHz. Quelle est la fréquence du premier harmonique ?

g) La douzième onde supérieure d'une fréquence est de 39 MHz. Quelle est la longueur d'onde de l'onde fondamentale ?

h) La fréquence d'une tension alternative est de 20 kHz. La valeur de pointe de la tension est de 4 V. Au moment t = 0 la valeur de la tension passe par zéro et augmente vers le sens positif. Quelle est la grandeur de la valeur instantanée après 23 ms ?

II. Courant triphasé

1. Introduction

L'alimentation de l'industrie et des ménages en énergie électrique est assurée au moyen de systèmes polyphasés et de nos jours le système triphasé est partout utilisé. Les groupes générateurs à essence qui alimentent les grosses installations de l'armée produisent également du courant triphasé. Le courant triphasé présente bien des avantages, en particulier lors de la construction des générateurs et des moteurs, mais aussi au point de vue de son exploitation il surpasse le courant monophasé. La technique, relativement simple, des circuits à courant triphasé doit être familière au praticien en particulier lorsque l'occasion se présente de devoir raccorder des appareils à un réseau triphasé.

2. Que savez-vous concernant le courant triphasé ?
(solutions page 439)

a) Les appareils ménagers et l'éclairage électrique fonctionnent, dans notre pays, sous une tension de 220 V, les moteurs au contraire, sont souvent alimentés avec 380 V. Connaissez-vous le rapport qui existe entre les valeurs de ces deux tensions ?
b) Avez-vous déjà entendu parler d'un montage en étoile ou en triangle ?
c) Qu'est-ce qu'un conducteur neutre ?
d) Combien de phases le courant triphasé ordinaire présente-t-il ?
e) Connaissez-vous les avantages du courant triphasé ?

3. Le courant triphasé

a. La production du courant triphasé

Le *courant triphasé* est produit par des *générateurs à courant triphasé*. Dans ces générateurs, les trois bobinages du stator sont montés de telle façon qu'ils se trouvent décalés de 120° l'un par rapport à l'autre. Un aimant permanent rotatif induit dans ces trois bobines trois tensions alternatives qui sont déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre. La figure 58 montre le principe de ce générateur et de la représentation vectorielle des tensions. Les trois bobinages du stator ont les mêmes nombres de spires pour que les trois tensions soient égales. La désignation de ces tensions, les tensions dites de phase, se fait de manière analogue à celle des conducteurs triphasés soit U_R, U_S et U_T. Les commencements des bobines portent les lettres U, V et W tandis que leurs autres extrémités sont désignées par les lettres X, Y et Z. La désignation des conducteurs est également normalisée et ceux-ci portent les lettres R, S et T.

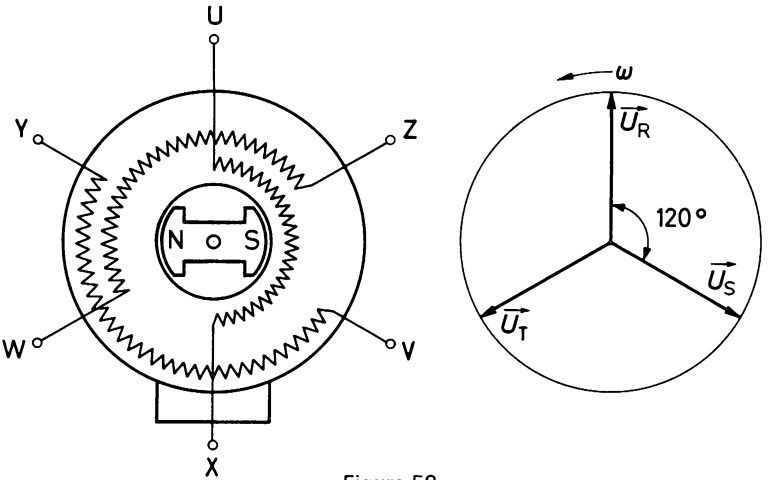


Figure 58

La figure 59 nous montre la désignation des bobines et des conducteurs. Le générateur présente 6 raccordements. Si l'on voulait charger séparément chaque système monophasé, il faudrait employer 6 conducteurs (6 lignes). Cette disposition des lignes serait en revanche très onéreuse.

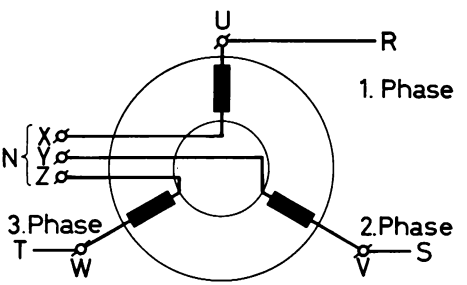


Figure 59

b. Le montage en étoile

Un générateur dont les raccordements X, Y et Z sont reliés fonctionne en *montage étoilé* (ou : montage en étoile). Le montage en étoile comporte donc un système à 4 conducteurs. Les lignes R, S et T sont nommées fils de phase tandis que le conducteur qui arrive au point milieu est désigné par le terme de fil neutre. Le symbole ⊥ représente le montage en étoile. Si les trois phases sont également chargées, aucun courant ne circule alors dans le conducteur neutre. La figure 60 nous montre le diagramme de ligne des trois tensions et courants d'un montage en étoile lorsque les trois phases sont également chargées.

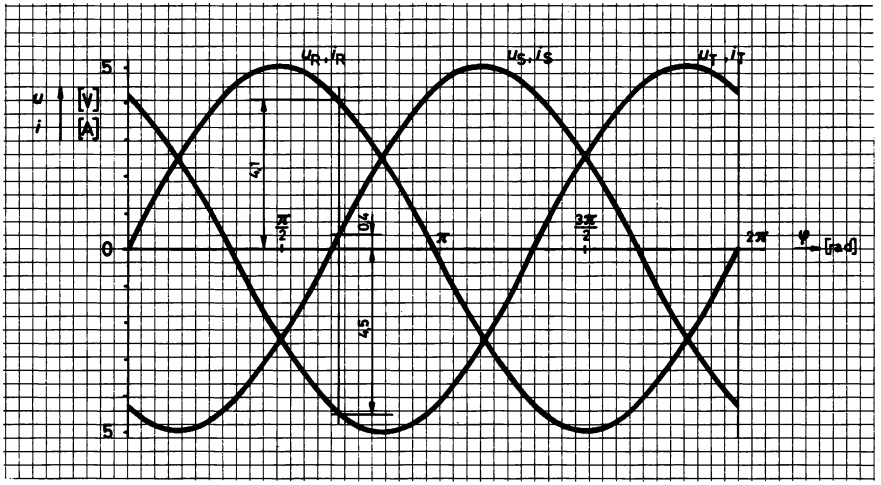


Figure 60

Nous pouvons, à n'importe quel moment, faire l'addition des trois tensions de phase ou des trois courants, leur somme est toujours égale à zéro. Le conducteur neutre serait par conséquent superflu puisqu'aucun courant ne le parcourt. Toutefois cela n'est valable que lorsque les phases sont toutes également chargées. Dès que les phases sont inégalement chargées, un courant s'écoule à travers le conducteur neutre. C'est pour cette raison que le conducteur neutre est utilisé dans la plupart des systèmes triphasés.

c. Le montage triangle

La figure 61 nous montre un utilisateur pour lequel le *montage triangle* a été choisi. Dans ce montage la fin d'une phase est reliée avec le commencement de la suivante. Le symbole du montage triangle est △.

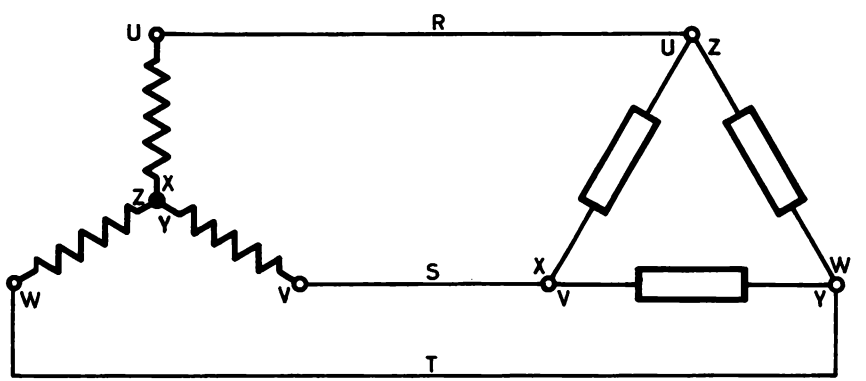


Figure 61

d. La tension composée

Le courant triphasé qui alimente les ménages présente en général une tension de phase de 220 V. Lorsque le générateur fonctionne en montage étoilé cela signifie qu'entre les trois fils de phase R, S, T et le conducteur neutre une tension de 220 V est mesurée.
La figure 62 nous permet de reconnaître un générateur utilisé en montage étoilé. Dans ce cas la tension de 220 V est nommée tension simple, elle est égale à la tension de l'enroulement (ou bobine).

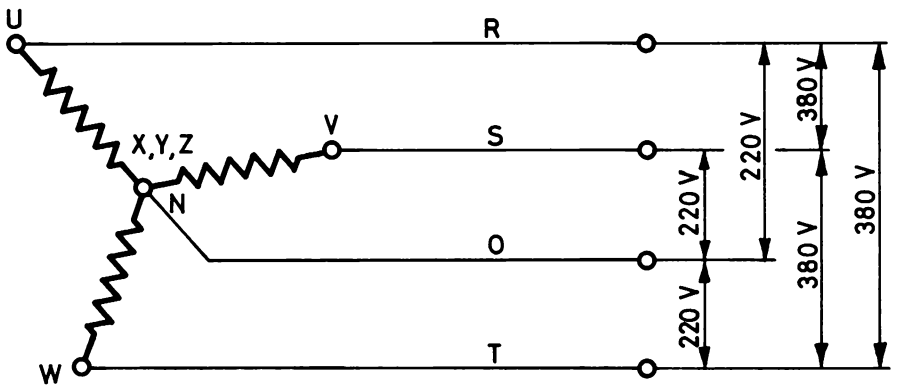


Figure 62

Lorsque nous mesurons la tension entre deux fils de phase nous constatons que cette tension est de 380 V, c'est celle que l'on nomme la *tension composée.* Cette tension tire son nom du fait qu'elle est le résultat de la composition de deux tensions de phase. Nos mesures nous ont permis de constater que la tension composée est plus élevée, d'un certain facteur, que la tension de phase (ou tension simple). Lorsque nous examinons ce facteur de plus près, nous constatons que sa valeur est de $\sqrt{3}$.

Tension composée = $\sqrt{3}$ fois la tension de phase

Nous allons examiner de plus près la production de cette tension composée. Sur la figure 62 nous choisissons à cet effet la tension entre R et S. La tension composée résulte des tensions de phase U_R et U_S. Elle correspond au circuit série de ces deux tensions de phase. Il nous suffit d'additionner les valeurs momentanées des tensions de phase pour obtenir la valeur momentanée de la tension composée. Cependant nous devons prendre garde à ce que les deux tensions de phase soient reliées en opposition, car là, les deux extrémités des bobines X et Y sont reliées ensemble. Par conséquent, nous devons additionner l'une des deux tensions de phase avec un signe inversé. La figure 63 nous montre cette addition effectuée sous forme de diagramme linéaire.

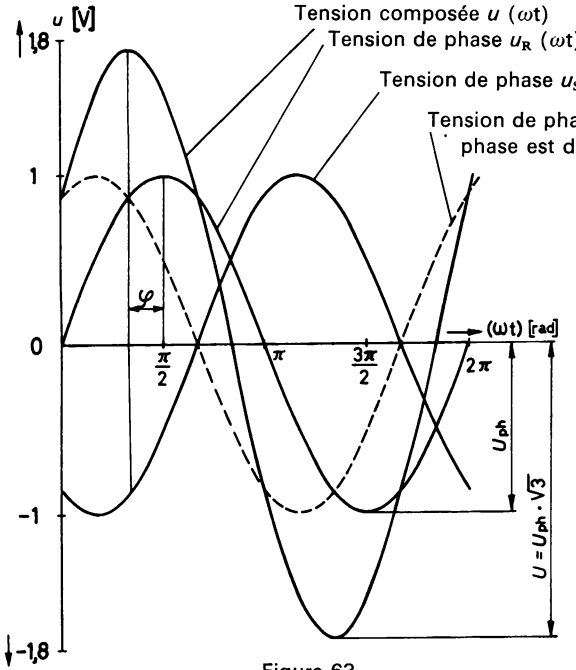
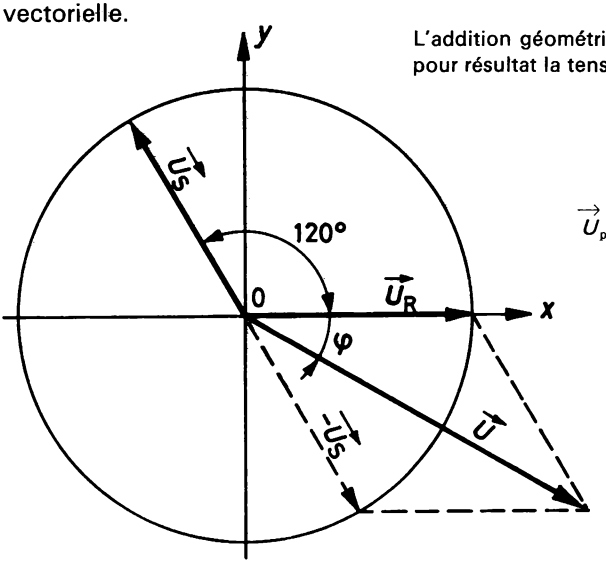


Figure 63

Représentation de la tension de phase et de la tension composée en un diagramme linéaire.

La figure 64 montre la même opération mais au moyen de la représentation vectorielle.



L'addition géométrique des tensions de phase a pour résultat la tension composée.

$\vec{U}_{ph} \cdot \sqrt{3}$ = tension composée U

Figure 64

e. Calculs de puissances en courant triphasé

Lorsque la charge sur les trois phases est déséquilibrée il faut alors calculer, séparément, la puissance prélevée pour chaque phase. Ce cas se présente souvent lors de l'emploi de petits utilisateurs tels que sources d'éclairage, appareils ménagers et petits moteurs qui sont reliés entre les différentes phases et le conducteur neutre.

La figure 65 nous montre un exemple de charge équilibrée entre les trois phases. Dans ce cas, la puissance peut être trouvée directement. A cet effet, nous mesurons la tension U entre deux conducteurs et le courant I dans l'une des lignes d'arrivée.

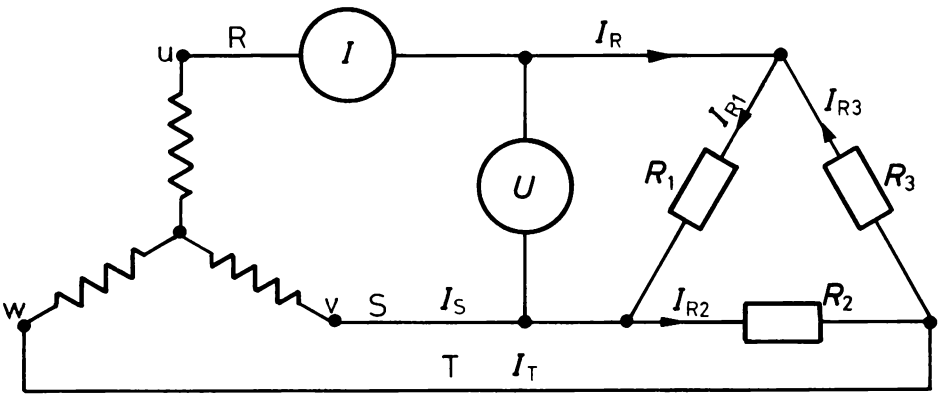


Figure 65

Dans le montage triangle, les courants doivent être additionnés vectoriellement comme ce fut le cas des tensions dans le montage en étoile. Par conséquent, le courant dans le conducteur d'amenée est plus grand d'un facteur de 1,73 que celui de l'un des utilisateurs isolés.

$$\text{Courant composé} = \sqrt{3} \cdot \text{courant de phase}$$

Par conséquent, la puissance par phase est de :

$$P_{ph} = \frac{U \cdot I}{\sqrt{3}}$$

La puissance totale est trois fois plus grande :

$$P = 3\frac{U \cdot I}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Ces valeurs ne sont valables que pour une charge ohmique pure. Cela signifie que la résistance de charge doit être une résistance ohmique. Nous verrons dans un chapitre suivant, pourquoi cette restriction est nécessaire.

f. La commutation étoile-triangle

Les moteurs et les groupes convertisseurs, qui sont alimentés en courant triphasé, sont souvent équipés d'un commutateur étoile-triangle. Si les enroulements du moteur à courant triphasé sont branchés en montage étoile, une tension de 220 V est alors appliquée à chaque enroulement, alors que, en montage triangle le même enroulement supporte une tension de 380 V. En montage étoile, le moteur prélève moins de courant sur le réseau que s'il est relié en montage triangle ; il démarre lentement et après avoir atteint un certain nombre de tours, il est branché par un commutateur en montage triangle sur la pleine tension. De cette façon l'écoulement de trop forts courants est évité lors du démarrage.

g. La représentation vectorielle des grandeurs de courants alternatifs

Nous avons vu que les grandeurs des courants alternatifs peuvent se représenter de deux façons, en *diagramme linéaire* ou par des *vecteurs*. Le diagramme linéaire est difficile à dessiner et donne l'impression d'être peu explicite. La représentation vectorielle est une manière élégante de présenter de façon simple et claire les grandeurs des courants alternatifs. Nous allons nous familiariser avec les règles fondamentales du calcul vectoriel car ce mode de représentation nous accompagnera tout au long de ce cours pratique.

Lorsque nous voulons représenter une tension alternative nous devons prendre deux grandeurs en considération, la valeur de la tension et la direction ou position de phase de cette tension. Le vecteur est le moyen parfait qui nous permet de représenter des tensions et des courants. La longueur du vecteur indique la *grandeur* de la tension et sa *direction* la position de phase. Pour représenter les grandeurs de courants alternatifs, des vecteurs sur un plan suffisent. Cependant, la physique utilise souvent des vecteurs dans l'espace (dans les 3 dimensions) ; mais nos problèmes peuvent tous se résoudre dans un espace à deux dimensions.

Pour représenter des vecteurs on utilise souvent les caractères allemands (ou gothiques). Ces caractères n'étant plus d'utilisation courante, la désignation la plus employée est :

$$\vec{BC}$$

Le trait avec sa flèche signifie qu'il s'agit d'une grandeur dirigée.

Dans les cas où seule la valeur joue un rôle on utilise la désignation suivante :

$$|a| = \text{longueur du vecteur } \vec{a}$$

Les vecteurs dont le point de départ se confond avec l'origine d'un système de coordonnées se nomment vecteurs liés ou d'origine. Dans la technique des courants alternatifs on utilise souvent des vecteurs ayant la longueur « un » dans ce cas ils se nomment vecteurs unitaires.

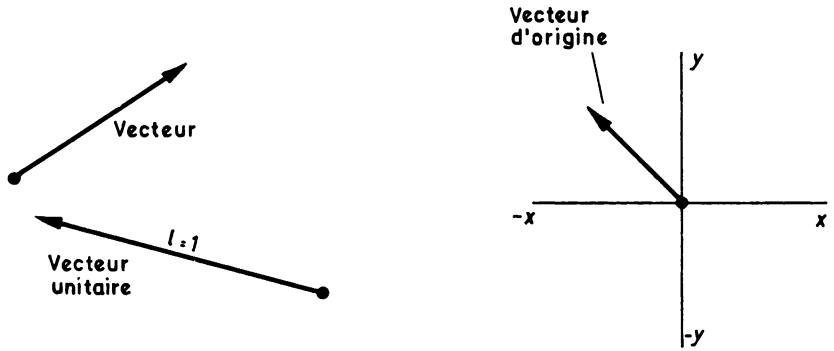


Figure 66

Dans un plan, chaque vecteur se scinde en deux composantes. Nous allons étudier cela au moyen d'un vecteur d'origine.

La figure 67 nous montre le vecteur $\vec{U}$ scindé en ses composantes $\vec{U}_x$ et $\vec{U}_y$. Il existe pour chaque vecteur un nombre infiniment grand de composantes résultant de la décomposition de ce vecteur.

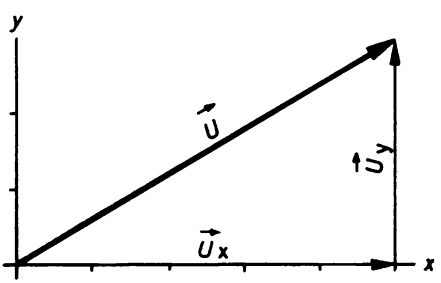


Figure 67

La technique du courant alternatif est principalement intéressée par la décomposition d'un vecteur d'origine dont les composantes coïncident avec l'axe des X ou avec l'axe des Y.
Un cas particulier, important en technique du courant alternatif, est celui du vecteur unitaire tournant.

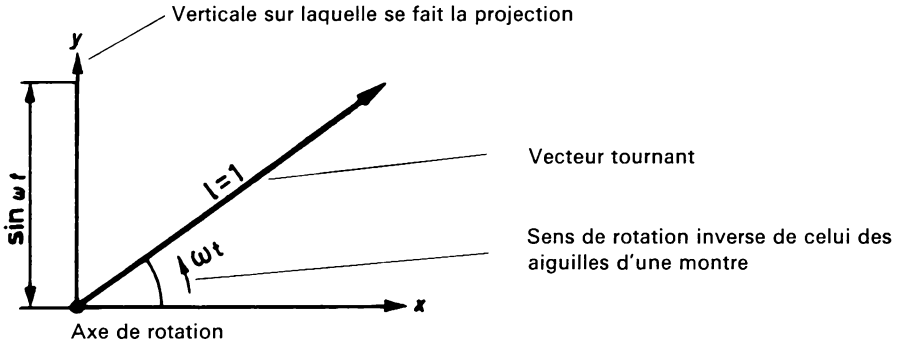


Figure 68

La figure 68 nous montre un vecteur unitaire qui tourne autour de son axe de rotation avec une vitesse constante en sens inverse de celui des aiguilles de montre. La projection sur l'axe des Y correspond à la fonction du sinus. La représentation des phénomènes dans les circuits à courant alternatif nécessite souvent l'addition ou la soustraction des différents vecteurs. Partout où deux grandeurs de courant alternatif se superposent, la troisième grandeur qui en résulte provient de l'addition de deux vecteurs. La figure 69 montre avec quelle simplicité cette addition s'effectue. Les vecteurs sont déplacés parallèlement à eux-mêmes et aboutés l'un avec l'autre (on appelle cela : faire la somme géométrique des vecteurs). Le vecteur résultant est représenté par la ligne qui relie le point de départ du premier vecteur et la pointe du dernier vecteur.

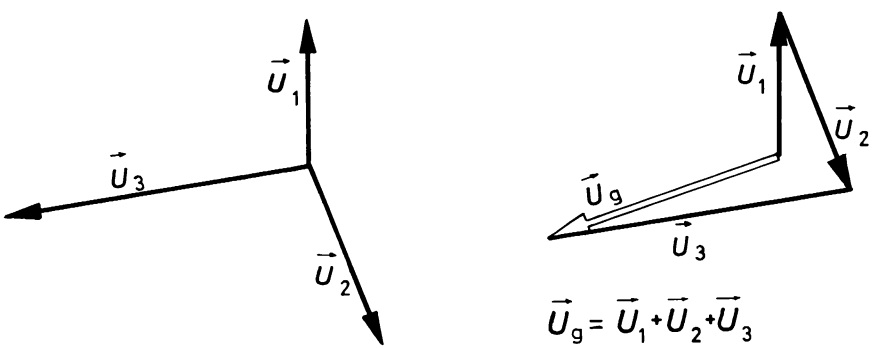


Figure 69

Si des vecteurs sont soustraits l'un de l'autre le sens du vecteur à soustraire est tourné de 180° et le vecteur ainsi inversé est additionné.
La figure 70 nous montre l'exemple d'une soustraction.

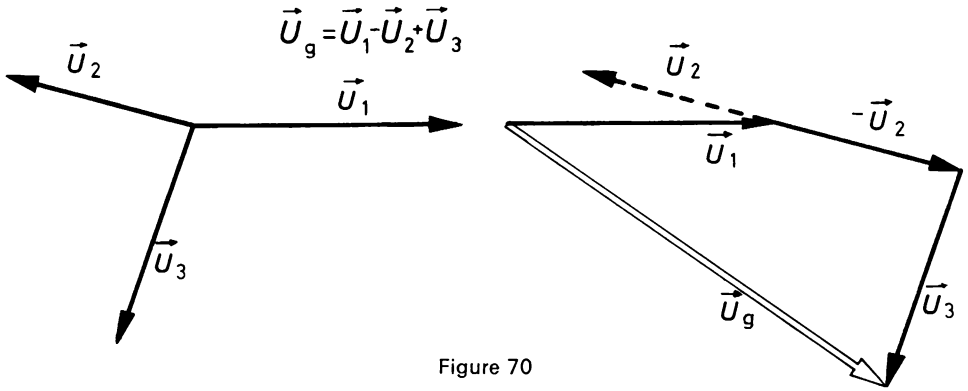


Figure 70

Il n'est pas nécessaire que vous en sachiez plus concernant les vecteurs. Grâce aux connaissances acquises vous pouvez résoudre facilement les problèmes suivants.

4. Exemples

a) Démontrer à l'aide de la représentation vectorielle que pour un utilisateur en montage triangle le courant composé est $\sqrt{3}$ fois plus grand que le courant de phase.

Marche à suivre:

- *Dessiner le circuit d'utilisation*
- *Sur le schéma marquer les courants des lignes* I_R, I_S et I_T
- Dessiner le diagramme des courants de lignes et des courants de phases.
- Dessiner les courants de phases I_{RS_1}, I_{ST_2} et I_{TR_3}
  Ici, il faut observer qu'un décalage de 120° règne entre les courants de phases. Nous dessinons d'où s'écoulent les trois courants de phases et notons, derrière leur désignation dans quel sens ils s'écoulent dans les conducteurs. Nous dessinons maintenant le courant de retour, décalé de 180° et marquons à nouveau dans quel conducteur il a lieu. De cette façon, nous obtenons pour chaque conducteur un courant d'aller et un autre de retour. L'addition vectorielle des courants pour chaque conducteur donne le courant total. En mesurant simplement la valeur des vecteurs, nous constatons que les vecteurs des courants de lignes sont 1,73 fois plus longs que ceux des vecteurs de phases. Preuve mathématique : les pointes des vecteurs des courants de phases se trouvent aux angles d'un hexagone régulier dont les côtés sont égaux aux rayons du cercle, dans notre cas ils sont égaux à la longueur des vecteurs des courants de phase. Le côté de l'hexagone est divisé en deux par le vecteur de ligne et ce côté divise à son tour en deux le vecteur de ligne. D'après le théorème de Pythagore la demi-longueur du vecteur de ligne (phase) est :

$$\frac{I}{2} = \frac{I_{ph}}{2}\sqrt{3} \text{ et le vecteur de ligne total } I = I_{ph} \cdot \sqrt{3}$$

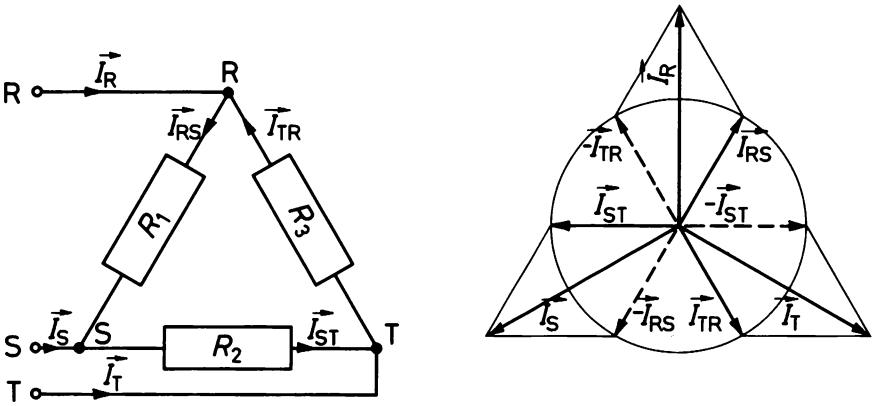


Figure 71

b) Un réseau triphasé est utilisé pour alimenter divers utilisateurs ohmiques. Les phases sont chargées de façon inégale. Déterminer graphiquement les courants de lignes et le courant du conducteur neutre.
La figure 72 nous montre le schéma.

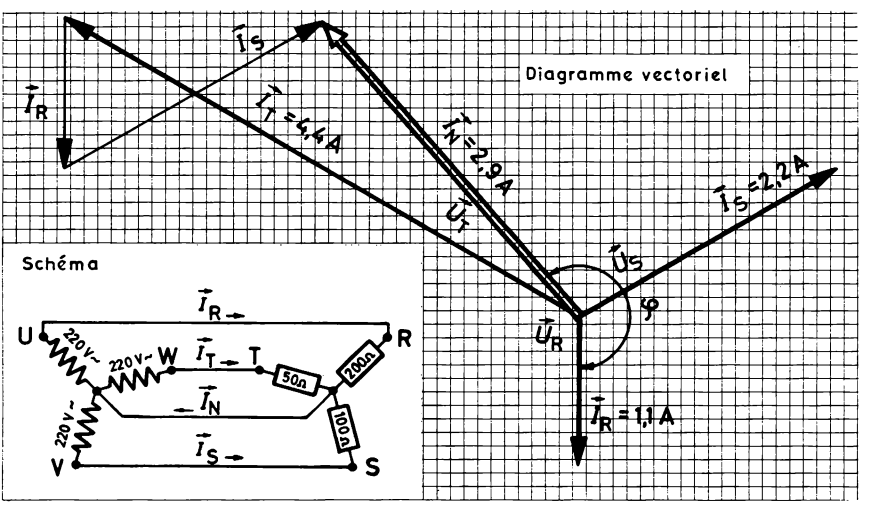


Figure 72

Marche à suivre:
– Reporter sur le diagramme les tensions entre phases et le conducteur neutre avec un décalage de phase de 120°.

– Choisir une échelle pour les courants (par exemple 2 cm par A).
– Calculer les courants dans chaque conducteur de ligne et les reporter en phase avec les tensions de phase sur le diagramme :

$$\vec{I}_R = 1{,}1\ A,\ \vec{I}_S = 2{,}2\ A,\ \vec{I}_T = 4{,}4\ A$$

– Le courant total $\vec{I}_N$, lu sur le diagramme, est de 2,9 A, ce courant s'écoule dans le conducteur neutre. Par rapport au courant de ligne $\vec{I}_R$ son déphasage est de 221°.

5. L'essentiel

En courant triphasé un décalage de 120° règne entre les diverses tensions de phases.
Lors du montage en étoile, les enroulements (bobines) des générateurs ou des utilisateurs (charges) sont reliés en forme d'étoile. Dans le montage en étoile, un réseau présente un conducteur neutre en plus des trois conducteurs de lignes. La tension entre le conducteur neutre et le conducteur de ligne s'appelle tension de phase. La tension entre deux conducteurs de lignes se nomme tension composée, elle est plus grande d'un facteur de $\sqrt{3}$ (ou 1,73) que la tension de phase.
Lors du montage en triangle, les enroulements des générateurs ou des utilisateurs sont reliés en forme de triangle. Dans le montage en triangle il n'y a pas de conducteur neutre. Un utilisateur, branché en montage triangle et qui charge également les trois phases, prélève dans chaque conducteur de ligne un courant plus grand que le courant de phase dont le facteur de multiplication est de 1,73.
Les courants et les tensions alternatifs se représentent à l'aide de vecteurs. Un vecteur montre la grandeur et le sens d'un courant ou d'une tension. Les vecteurs s'additionnent simplement en les déplaçant parallèlement à eux-mêmes et en les aboutant (somme géométrique des vecteurs). Les vecteurs sont soustraits en les retournant de 180° et en les additionnant ensuite.

6. Exercices de répétition (solutions page 440)

a) Qu'entendez-vous par le terme de « tension composée » ?
b) Dessinez le diagramme vectoriel d'une tension composée.
c) Quelles sont les conditions pour qu'aucun courant ne s'écoule dans le conducteur neutre ?
d) Pourquoi, dans le cas d'un utilisateur branché en montage triangle, le courant de ligne est-il plus grand que le courant de phase ?
e) Un utilisateur branché en montage triangle charge les trois phases, d'un réseau à courant triphasé de 500 V, avec 200 ohms sur chacune d'elles. Dessinez le diagramme vectoriel des courants de phase et de ligne.

f) Un générateur est branché en montage étoile. La tension de phase est de 220 V. Il est chargé par un utilisateur à montage en triangle. Une phase est chargée avec 100 Ω, l'autre avec 80 Ω et la troisième avec 50 Ω. Dessinez le diagramme des vecteurs pour les courants de lignes et indiquez leurs valeurs.

g) Trois courants s'écoulent dans un conducteur neutre. Le premier est de 5 A, le second de 7 A et avance de 50° par rapport au premier, le troisième est de 10 A et avance de 170° par rapport au second. Dessinez le diagramme des vecteurs et cherchez le courant total. Quel est le déphasage du courant total par rapport à celui de 5 A ?

h) Qu'est-ce qu'un vecteur ?

F. Les composants linéaires

Par composants *linéaires* nous comprenons ceux pour lesquels une relation linéaire existe entre le courant et la tension. Les composants non linéaires tels que tubes, transistors, diodes, etc. présentent des caractéristiques courbes.

I. Résistances

1. Introduction

Les résistances font partie du groupe des composants de l'électronique que l'on rencontre le plus souvent dans les appareils. Leur emploi est extrêmement varié. Lorsqu'elles sont en série elles abaissent de trop grandes tensions à la valeur désirée ou limitent des courants à une valeur déterminée. Utilisées comme diviseurs de tensions elles les répartissent dans des proportions bien déterminées. Dans les circuits à tubes ou à transistors elles sont nécessaires au gain de tension et sont nommées résistances de travail. Dans les instruments de mesure, des circuits à résistances déterminent les échelles de mesure. La puissance sonore des récepteurs se règle au moyen de potentiomètres. L'énumération des domaines d'application des résistances pourrait se poursuivre à volonté.

2. Que savez-vous concernant les résistances ?
(solutions page 444)

a) Quel est le matériau utilisé pour fabriquer la plupart des petites résistances ?
b) En général, quelles sont les résistances qui supportent les plus grandes charges ; les résistances à fil ou à couche ?
c) Qu'est-ce qu'un potentionmètre ?
d) Avec quelle unité mesure-t-on les résistances ?

3. Les résistances

a. Résistances à couche

Dans les résistances à couche, le matériau résistant formé d'une mince couche est supporté par un corps en matière isolante. Le carbone ou des oxydes métalliques sont utilisés comme matériaux résistants. La figure 73 nous montre des résistances à couche dont la structure est rendue visible après avoir gratté la pellicule de laque.

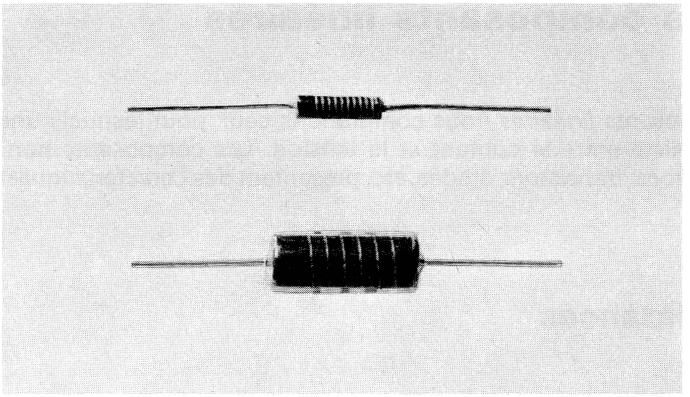


Figure 73

b. Les résistances agglomérées

La *résistance agglomérée* se compose d'un corps cylindrique de carbone comprimé. La figure 74 montre deux exécutions de résistances agglomérées dont la structure est rendue visible après enlèvement de la pellicule de laque.

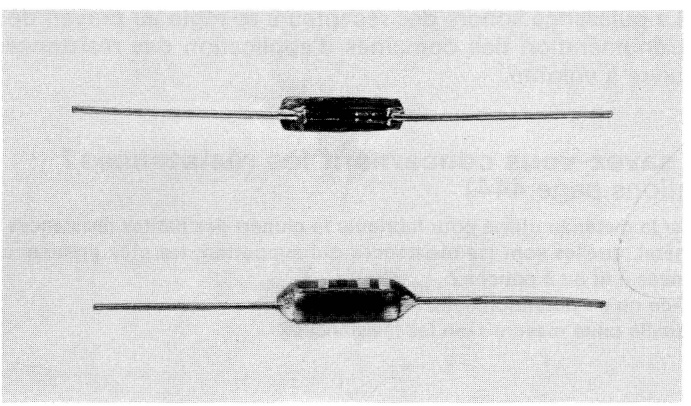


Figure 74

c. Résistances à fil

Les *résistances à fil* sont utilisées pour dissiper de plus grandes puissances. Le matériau résistant se compose d'un fil mauvais conducteur bobiné sur un tube en céramique. Les résistances à fil sont souvent munies d'un collier réglable.

Ce collier permet de diviser la résistance en deux parties distinctes, le rapport de division peut facilement se régler. La figure 75 nous montre diverses résistances à fil : trois résistances normales dont la valeur est fixe mais permettant des dissipations de puissance différentes ; à gauche, avec enrobage de protection comprimé ou avec vitrification.
Sur l'image de droite, la couche de protection est enlevée. Tout à droite, nous voyons une résistance à collier.
A cause de l'inductance due à l'enroulement du fil, les résistances à fil ne peuvent être utilisées que pour le courant continu ou pour le courant alternatif de basse fréquence.

RÉSISTANCES A FIL

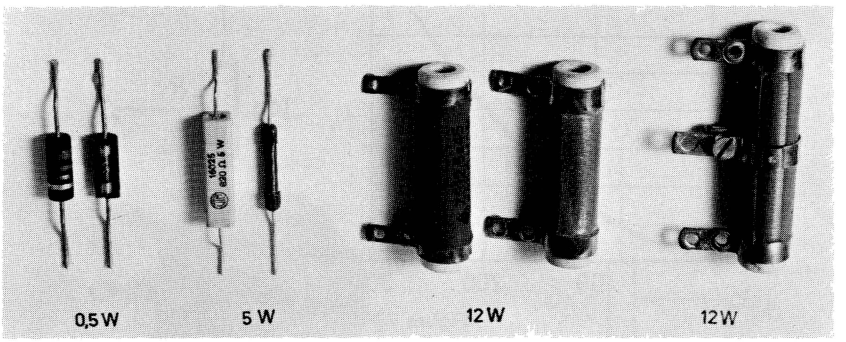


Figure 75

d. Potentiomètres

Les *potentiomètres* sont des résistances possédant un contact réglable. La plupart du temps, ils sont utilisés comme diviseurs de tension variable. On fait une distinction entre les *potentiomètres linéaires* et les *potentiomètres logarithmiques.*

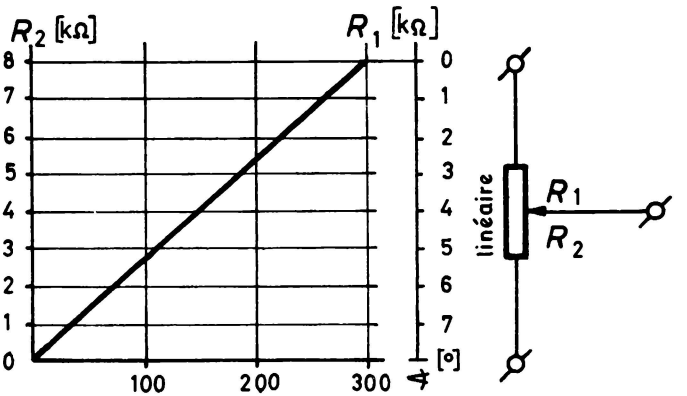


Figure 76

La valeur ohmique des potentiomètres linéaires varie, à chaque instant, proportionnellement avec l'angle de rotation de l'axe. La figure 76 nous montre la variation de la courbe d'un potentiomètre linéaire (c'est une droite). Les potentiomètres linéaires sont très souvent utilisés dans les circuits de mesure et les appareils de mesure comme diviseurs de tension variables. La valeur ohmique des potentiomètres logarithmiques varie, à chaque instant, selon une courbe logarithmique (caractéristique logarithmique). La figure 77 nous montre la courbe caractéristique d'un potentiomètre logarithmique.

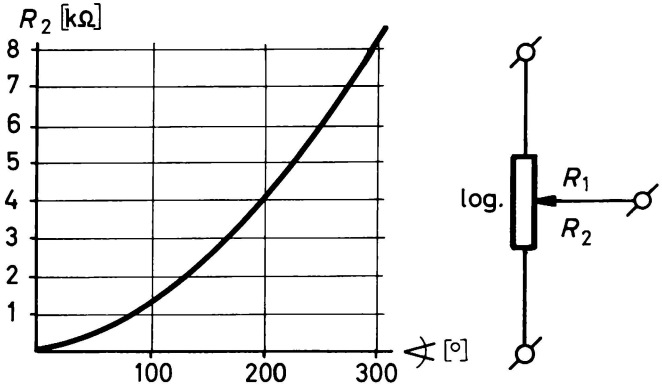
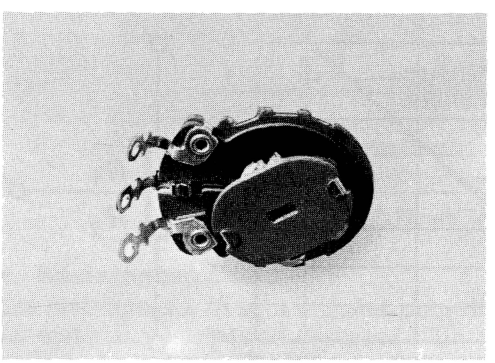


Figure 77

Les potentiomètres logarithmiques sont presque toujours utilisés pour le réglage de la puissance sonore et de la tonalité dans les amplificateurs BF. Pour cette application un réglage par potentiomètre linéaire est inadapté car, à cause de la sensibilité auditive logarithmique de l'oreille humaine, la zone de réglage doit être fortement resserrée à une extrémité.



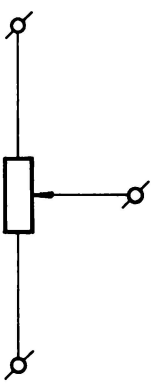


Figure 78

Dans le commerce, on trouve des potentiomètres de formes d'exécution très différentes. Le plus employé est le *potentiomètre à couche de carbone.* Il se compose d'une piste circulaire de carbone sur laquelle s'appuie un contact mobile solidaire d'un axe. Les potentiomètres à couche de carbone sont fabriqués pour des valeurs qui vont de quelques ohms à quelques mégohms et pour des charges allant jusqu'à 0,5 W. La figure 78 nous montre un potentiomètre à couche de carbone et son symbole correspondant.
Dans le *potentiomètre bobiné* (avec du fil spécial), la couche de carbone est remplacée par un bobinage de fil. Ces potentiomètres sont construits pour de plus grandes puissances. Utilisés en vue de mesures, les potentiomètres bobinés sont fabriqués avec d'étroites tolérances. La figure 79 nous montre un potentiomètre bobiné et son symbole correspondant.

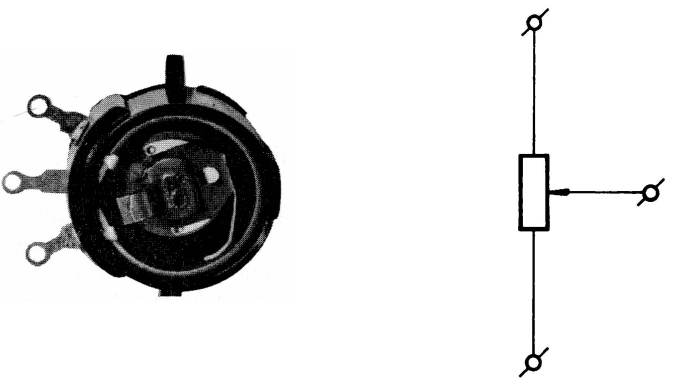
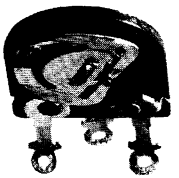


Figure 79

Les *potentiomètres ajustables* ou *trimmers* sont utilisés en vue d'effectuer des ajustages. Leur exécution est la même que celle des autres potentiomètres à couche de carbone ou à fil. Ils trouvent leur utilisation dans les circuits qui nécessitent un ajustage de la valeur des résistances ou du rapport des tensions. La différence avec un potentiomètre ordinaire réside dans le fait que l'ajustage se fait la plupart du temps à l'intérieur des appareils et que le potentiomètre est réglé avec un tournevis au lieu de pouvoir se faire par un bouton de réglage facilement accessible. La figure 80 nous montre deux potentiomètres trimmers et leur symbole correspondant, à gauche une exécution normale et à droite un modèle prévu pour montage sur des circuits imprimés.



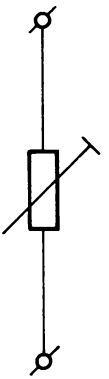


Figure 80

e. Caractéristiques des résistances

Une résistance est caractérisée par: sa *valeur*, sa *charge admissible*, la *tolérance* de sa valeur et son *coefficient de température*. Pour la plupart des résistances à couche et agglomérées, la valeur de la résistance et la tolérance sont directement lisibles au moyen d'un code de couleurs qui se présente sous la forme d'anneaux colorés. Le premier anneau désigne le premier chiffre, le deuxième anneau le deuxième chiffre, le troisième anneau indique le nombre de zéros à ajouter aux deux premiers chiffres alors que le quatrième anneau donne la tolérance. La figure 81 montre un exemple du codage d'une résistance.

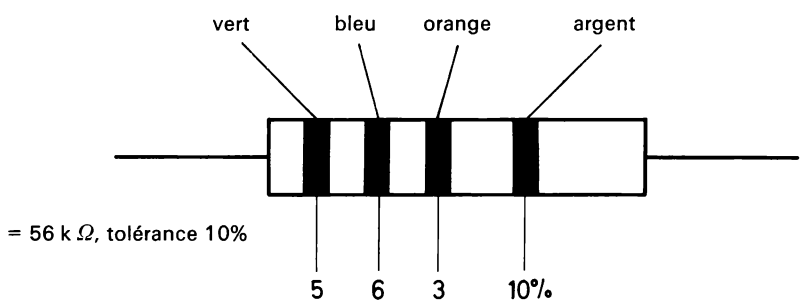


Figure 81

Dans le tableau 9 toutes les indications concernant le code de couleurs des résistances sont rassemblées.

Couleur	1. anneau 1. chiffre	2. anneau 2. chiffre	3. anneau multiplicateur		4. anneau tolérance ± %
noir	0	0	×1	$= 10^0$	–
brun	1	1	×10	$= 10^1$	1
rouge	2	2	×100	$= 10^2$	2
orange	3	3	×1000	$= 10^3$	–
jaune	4	4	×10000	$= 10^4$	–
vert	5	5	×100000	$= 10^5$	–
bleu	6	6	×1000000	$= 10^6$	–
violet	7	7	×10000000	$= 10^7$	–
gris	8	8	–		–
blanc	9	9	–		–
or	–	–	×0,1	$= 10^{-1}$	5
argent	–	–	×0,01	$= 10^{-2}$	10
manque	–	–	–		20

Tableau 9

Les valeurs des résistances se trouvant ordinairement dans le commerce sont ordonnées selon une *série normalisée* (valeur standard). Dans cette suite normalisée, les valeurs sont choisies de telle façon que toutes les valeurs intermédiaires soient possibles avec les résistances du groupe de tolérance correspondant.

Série normalisée pour une tolérance de 10% :
10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82

Série normalisée pour une tolérance de 5% :
10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91

La figure 82 nous montre la représentation graphique des deux séries de tolérances. Les traits verticaux indiquent la place des résistances correspondantes.

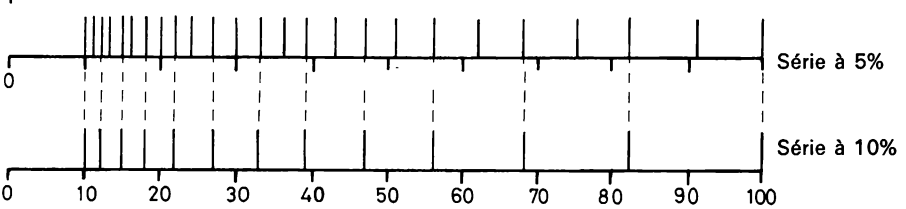


Figure 82

La *charge admissible*, que peut supporter une résistance, dépend du matériau résistant employé et des dimensions géométriques de celle-ci. Les limites de charge ordinaires des résistances à couche et agglomérées sont :

0,1 – 0,25 – 0,5 – 1 watt

Les résistances à fil (bobinées) permettent d'atteindre des charges admissibles plus élevées. Les valeurs normalisées pour les résistances à fil sont :

0,5 – 1 – 2 – 3 – 4 – 6 – 12 – 25 – 50 watts

Le coefficient de température est un rapport numérique qui indique de quel facteur la valeur d'une résistance est modifiée par °C de variation de la température. Les coefficients de température des métaux ordinaires sont positifs mais le carbone présente un coefficient négatif. Les coefficients de température des matériaux les plus importants sont rassemblés dans le tableau 10.

Matériau	Coefficient de température $\alpha_{20°}$ *
Aluminium	0,0039
Fer	0,0052-0,0062
Carbone	−0,0005
Constantan	±0,0002
Cuivre	0,00393
Argent	0,0034
Or	0,0038

Tableau 10

* Prendre garde que α est lui-même dépendant de la température.

Le calcul d'une résistance à chaud s'effectue selon la relation simple suivante :

$R_w = R_{20°} [1 + \alpha (\vartheta - 20°)]$

R_w Résistance à chaud

$R_{20°}$ Résistance à 20°C

α Coefficient de température

ϑ Température de la résistance en °C

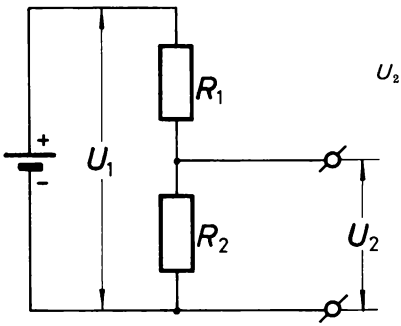
f. Résistances en série

La résistance totale d'un circuit dans lequel les résistances sont reliées en série est égale à la somme des résistances partielles.

$$R_g = R_1 + R_2 + R_3 \ldots + R_n$$

Les résistances reliées en série sont souvent utilisées comme *diviseurs de tension*. Sur chaque résistance du diviseur règne une tension partielle. Le choix des résistances permet d'obtenir un rapport quelconque de la division des tensions.

La figure 83 nous montre un diviseur de tension simple et l'équation du calcul de la tension partielle. Le calcul de ce diviseur de tension est basé sur la loi d'Ohm.

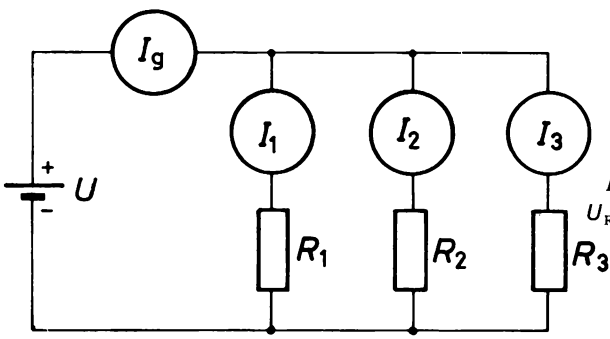


$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Figure 83

g. Résistances en parallèle

Des résistances reliées en parallèle sont toutes soumises à la même tension. La somme des courants partiels donne le courant total du circuit. La figure 84 montre cette relation.



$$I_g = I_1 + I_2 + I_3$$
$$U_{R_1} = U_{R_2} = U_{R_3} = U$$

Figure 84

Nous avons appris que la valeur réciproque de la résistance est la conductance. Courant et conductance se comportent proportionnellement l'un par rapport à l'autre, nous pouvons dire par conséquent que :
lors de la mise en parallèle de résistances, la somme des conductances partielles est égale à la conductance totale.

$$G_g = G_1 + G_2 + G_3 + \ldots G_n$$

Pour calculer la résistance équivalente d'un circuit en parallèle les conductances sont additionnées. Nous cherchons la valeur réciproque de la conductance totale ainsi obtenue ce qui correspond à la résistance équivalente.

$$R_g = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \ldots + \frac{1}{R_n}}$$

h. Valeur de la résistance et conducteur

De façon à éviter des pertes de chaleur inutiles, la valeur de la résistance d'une ligne doit être maintenue aussi faible que possible. Les lignes doivent avoir des dimensions en rapport avec le but de leur utilisation. La résistance d'un conducteur dépend de trois facteurs, soit :

la longueur de la ligne
la section de la ligne
le matériau utilisé

Plus la ligne est longue, plus sa résistance est grande. La résistance de la ligne est proportionnelle à sa longueur. L'influence de la section de la ligne sur sa résistance s'explique facilement grâce au modèle mécanique de la conduite d'eau, déjà étudié. Plus la section choisie pour une conduite d'eau est grande d'autant plus faible sera la résistance qu'elle oppose à l'écoulement du liquide. La ligne électrique présente un comportement analogue. La résistance de la ligne est inversement proportionnelle à sa section. Les propriétés électriques du matériau influencent également la valeur de la résistance du conducteur. On parle ici de *résistance spécifique.*
La valeur de la résistance spécifique est celle que possède un conducteur de 1 mètre de long et de 1 mm^2 de section pour le matériau considéré.
Le symbole de cette valeur est ϱ (rho).

L'unité de mesure est celle-ci : $\frac{V\ mm^2}{Am}$ ou $\frac{\Omega\ mm^2}{m}$

Dans le tableau 11, les valeurs de la résistance spécifique de divers matériaux conducteurs sont rassemblées.
Résistance spécifique de quelques métaux et alliages.

Métal/alliage	$\varrho \left[\frac{V \cdot mm^2}{A \cdot m}\right]$
Argent	0,0163
Cuivre	0,0177
Or	0,023
Aluminium	0,0286
Fer	0,096
Constantan	0,50

Tableau 11

On travaille souvent avec la valeur réciproque de la résistance spécifique. Cette valeur se nomme la *conductibilité* (1/p), cette valeur nous indique la conductance d'une ligne de 1 mètre de long dont la section est de 1 mm^2.

Le signe utilisé dans les formules est γ (gamma).

L'unité de mesure est : $\frac{A \cdot m}{V \cdot mm^2}$ ou $\frac{S \cdot m}{mm^2}$

Il s'ensuit les équations suivantes :

$R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$; $[R] = \frac{\Omega \ mm^2 \cdot m}{m \cdot mm^2} = \Omega$

l = longueur du conducteur
A = section du conducteur
lorsque le calcul est fait avec la résistance spécifique.

$G = \frac{\gamma \cdot A}{l}$; $[G] = \frac{m \cdot mm^2 \cdot S}{m \cdot mm^2} = S$

lorsque le calcul est fait avec la conductibilité.

S = siemens

4. Exemples

a) Deux bobines sont reliées en série. L'une comprend 600 m de fil de cuivre d'un diamètre de 0,3 mm, l'autre comprend 200 m de fil de cuivre d'un diamètre de 0,8 mm. Quelle est la résistance du circuit si la température ambiante est de 50° C ?

Marche à suivre:
Première étape : calculer la résistance des deux bobines à 20° C

– écrire la formule de base $R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$

– introduire les valeurs et calculer $R_1 = \frac{0{,}0177 \cdot 600}{0{,}15^2 \cdot \pi} \ \frac{\Omega \cdot mm^2 \cdot m}{m \cdot mm^2}$

$R_1 = 150 \ \Omega$

$R_2 = \frac{0{,}0177 \cdot 200}{0{,}4^2 \cdot \pi}$

$R_2 = 7{,}04 \ \Omega$

Deuxième étape : calcul de la résistance totale

– écrire la formule $R_g = R_1 + R_2$

– introduire les valeur et calculer $R_g = 150 \ \Omega + 7{,}04 \ \Omega$

$R_g = 157{,}04 \ \Omega$

Troisième étape : calculer la résistance du circuit pour une température de 50°C

– écrire la formule $R_w = R_{20°} \ [1 + \alpha_{20°} \cdot (\vartheta - 20°)]$

– introduire les valeurs et calculer $R_w = 157{,}04 \ [1 + 0{,}00393 \cdot (50 - 20)]$

$R_w = \mathbf{175{,}5} \ \Omega$

b) Calculez le circuit de la figure 85

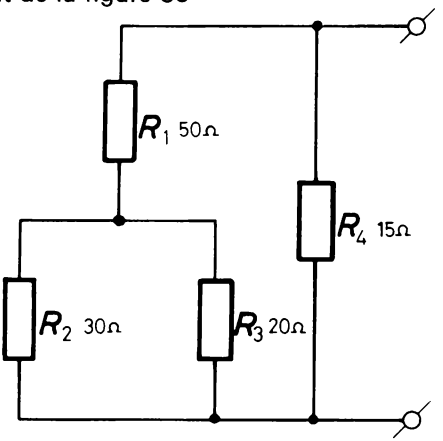


Figure 85

Marche à suivre:
Première étape: calculer le circuit en parallèle $R_2 \,||\, R_3$

– *écrire la formule de base:* $\dfrac{1}{R_g''} = \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}$

– extraire R_g de la formule $R_g'' = \dfrac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$

– introduire les valeurs et calculer $R_g'' = \dfrac{30 \cdot 20}{50}$

$R_g'' = 12\ \Omega$

Deuxième étape: calculer le circuit $R_1 + (R_2 \,||\, R_3)$
– écrire la formule de base $R_g' = R_1 + (R_2 \,||\, R_3)$
– introduire les valeurs et calculer $R_g' = 50 + 12$
$R_g' = 62\ \Omega$

Troisième étape: calcul du circuit équivalent

– écrire la formule de base $R_g = \dfrac{R_g' \cdot R_4}{R_g' + R_4}$

– introduire les valeurs et calculer $R_g = \dfrac{62 \cdot 15}{77}$

$R_g = \mathbf{12{,}07\Omega}$

5. L'essentiel

Nous distinguons plusieurs genres de fabrication des résistances. En électronique nous employons principalement les résistances à couche, agglomérées et à fil (bobinées).

Les potentiomètres sont des résistances possédant un contact réglable. On fabrique des potentiomètres à couche de carbone et à fil bobiné. Les résistances sont normalisées dans les séries de 5% et de 10%. La valeur et la tolérance sont marquées sur la résistance sous forme d'anneaux colorés composant un code. Les résistances présentent un coefficient de température, qui comme son nom l'indique influe la valeur de la résistance lorsque la température varie.
Des résistances en série présentent une résistance totale qui correspond à la somme des résistances partielles.
Dans le cas de résistances en parallèle les conductances de chacune des résistances s'additionnent ce qui permet de calculer la conductance totale du circuit.
On peut calculer la résistance des lignes lorsque la résistance spécifique ou la conductibilité du matériau de la ligne, sa longueur et sa section sont connues. La valeur de la résistance d'une ligne est proportionnelle à sa résistance spécifique et à sa longueur mais inversement proportionnelle à sa section.

6. Exercices de répétition (solutions page 445)

a) Nommez trois genres de résistances fixes que vous connaissez.
b) Qu'est-ce qu'un potentiomètre ?
c) Quelle est la différence entre un potentiomètre logarithmique et linéaire ?
d) Indiquez un exemple d'utilisation de ces deux genres de potentiomètres.
e) Où les trimmpotentiomètres sont-ils employés ?
f) Nommez les couleurs correspondant aux chiffres de 0 à 9 dans le code des couleurs.
g) Comment les tolérances des résistances sont-elles indiquées ?
h) Quels genres de séries normalisées connaissez-vous ?
i) Comment calcule-t-on un circuit de résistances reliées en série ?
k) Quelles lois sont applicables pour les résistances reliées en parallèle dans un circuit ?
l) De quels facteurs la résistance d'un conducteur est-elle dépendante ?
m) Qu'entendez-vous par le terme « résistance spécifique » ?
n) Deux bobines L_1 et L_2 sont reliées en série, la bobine L_3 est reliée parallèlement à ce circuit. La température de ces bobines est de 60° C. Les bobines ont les caractéristiques suivantes :
   – L_1 : longueur du fil 500 m d'un diamètre de 0,7 mm, en cuivre.
   – L_2 : longueur du fil 210 m d'un diamètre de 0,3 mm, en aluminium.
   – L_3 : longueur du fil 50 m d'un diamètre de 0,6 mm, en fer ($\alpha_{20°} = 0{,}0055$).
   Calculez la résistance de ce circuit, à 60° C.

II. Condensateurs

1. Introduction

L'un des plus importants composants de l'électrotechnique, en particulier dans la technique des courants alternatifs, est le condensateur. Dans la technique des télécommunications il n'existe pratiquement aucun circuit ou appareil dans lequel des condensateurs, de formes et de grandeurs diverses, ne soient employés. Le condensateur est en outre le plus ancien composant de la physique. Dès 1745, des expériences de physique sont effectuées avec des condensateurs qui, à cette époque, étaient confectionnés avec des bouteilles de verre recouvertes, à l'intérieur et à l'extérieur, d'une feuille d'un métal conducteur. A cause de leur forme et de leur provenance on les nomma « bouteilles de Leyde ». Les condensateurs actuels n'ont plus que le principe de fonctionnement en commun avec les bouteilles de Leyde. Leurs formes d'exécution sont adaptées aux besoins de notre technique moderne.
Dans les circuits à courant continu, les condensateurs sont utilisés comme cellules de filtrage et comme extincteurs d'étincelles. Dans les circuits basse fréquence nous les rencontrons en tant qu'éléments de couplage et parties constituantes des filtres. Dans les circuits haute fréquence ils sont indispensables pour la construction des circuits oscillants.

2. Que savez-vous au sujet des condensateurs ?
(solutions page 447)

a) Quelle est, en principe, la construction d'un condensateur ?
b) Quelle est l'unité employée pour la mesure des condensateurs ?
c) Le courant continu est-il bloqué par un condensateur ?
d) Quelles sont les propriétés d'un condensateur dans un circuit à courant alternatif ?
e) Nommez les sortes de condensateurs que vous connaissez.
f) Qu'est-ce qu'une intensité de champ électrique ou gradient de potentiel ?

3. Condensateurs

a. Définition

Le condensateur est un composant qui a la propriété d'accumuler une charge électrique. Dans les circuits à courant continu il se comporte comme une interruption (blocage, barrage, coupure) et oppose une résistance infinie au passage de ce courant. Dans les circuits à courant alternatif, il se comporte comme une résistance dont l'importance dépend de la valeur du condensateur et de la fréquence.

b. Principe

Un condensateur se compose de deux plaques métalliques isolées entre elles. L'isolant peut être de l'air ou tout autre matériau bon isolant. Le matériau isolant se nomme diélectrique. La figure 86 nous montre le principe de construction d'un condensateur et son symbole.

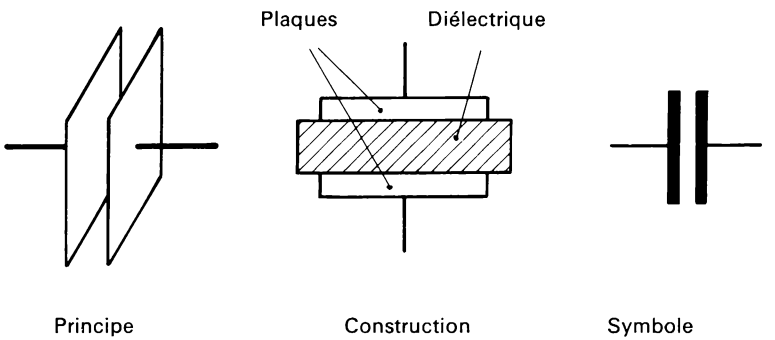


Figure 86

c. La charge électrique *Q*

La charge électrique *Q* est identique à la quantité d'électricité. Elle peut se comparer à la quantité d'eau accumulée dans un récipient.

Expérience:

Nous établissons le montage selon la figure 87 a.

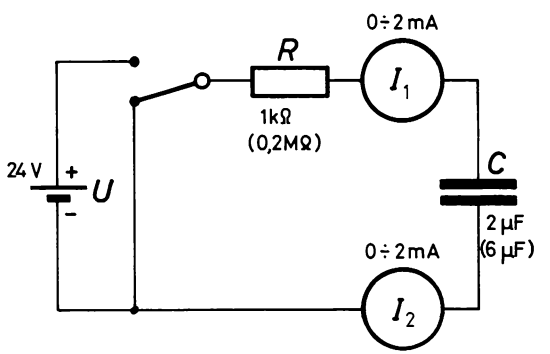


Figure 87a

La figure 87 b nous montre le montage de l'expérience.

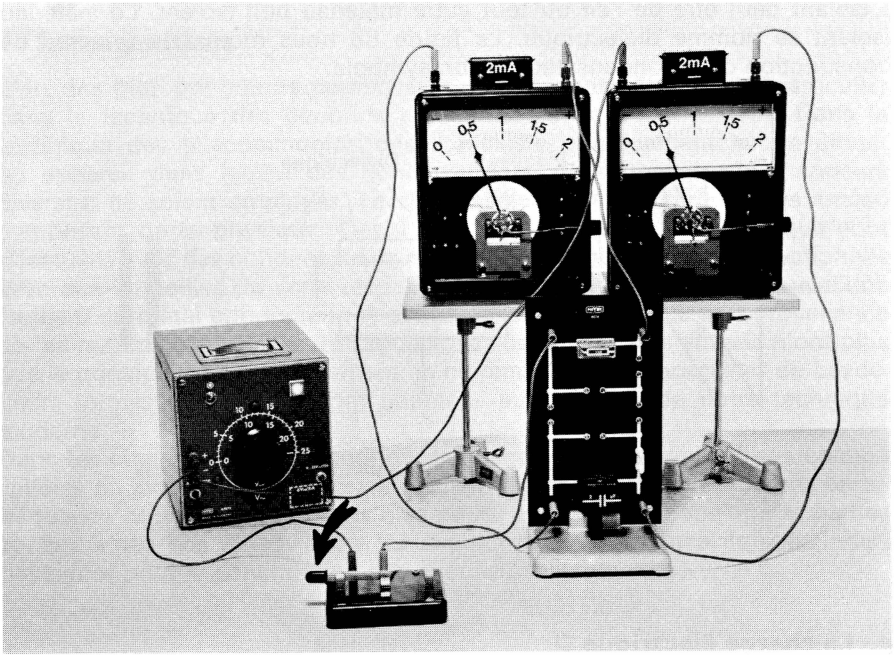


Figure 87b

Déroulement de l'expérience:
Nous branchons le commutateur sur la source de tension. Les deux milliampèremètres indiquent la même grandeur d'impulsion de courant. Nous remettons ensuite le commutateur sur sa position de repos, les deux milliampèremètres indiquent une impulsion de courant égale à la première mais de sens contraire.
Nous remplaçons la résistance $R = 1\ k\Omega$ par une autre de 200 $k\Omega$. L'impulsion de courant à l'enclenchement et au déclenchement est plus petite maintenant mais dure plus longtemps. Après un temps bref, d'environ 2 s, aucun courant n'est plus mesurable dans le circuit. Nous remplaçons le condensateur par un autre de plus grande capacité et répétons l'expérience. Maintenant, les impulsions de courant durent plus longtemps, ce qui s'observe par de plus fortes déflexions des aiguilles, malgré l'inertie du système de mesure.

Nous tirons l'enseignement suivant de cette expérience :
Le condensateur représente une interruption dans le circuit à courant continu. A l'instant de l'enclenchement, il s'écoule un courant qui diminue

rapidement. La durée de l'impulsion de courant dépend de la valeur de la résistance insérée en série dans le circuit et de la capacité du condensateur. Le courant qui s'écoule vers le condensateur lors de la charge est le même lors de la décharge. L'expérience prouve qu'une certaine quantité d'électricité s'est écoulée dans le condensateur lors de la charge. Cette quantité d'électricité ou charge est accumulée dans le condensateur. Un modèle mécanique va nous aider à rendre visible ce processus.
La figure 88 montre notre modèle.

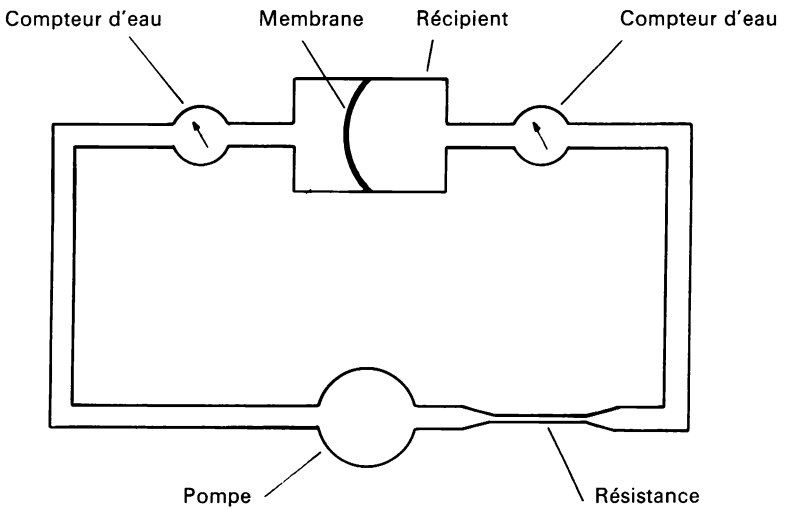


Figure 88

Un récipient est divisé en deux parties par une membrane en caoutchouc. Chaque chambre est reliée à un système de tubulures hydrauliques où la force motrice est une pompe. Le système est complètement rempli d'eau. La pompe comprime l'eau dans une chambre, la membrane se tend et expulse la même quantité d'eau hors de l'autre chambre. La quantité d'eau est mesurée par deux compteurs. Les deux compteurs indiquent la même quantité d'eau. Lorsque la section de la tubulure est fortement réduite sur une certaine longueur le débit est plus faible, par contre il dure plus longtemps. La durée de l'écoulement est plus grande si nous employons un grand récipient.
Aucune goutte d'eau n'a passé à travers la membrane et pourtant nous avons eu un écoulement. Le condensateur se comporte exactement de la même manière. Aucun courant ne s'écoule d'une plaque à l'autre à travers l'isolation et, cependant, nous mesurons une courte impulsion de courant dans le circuit extérieur.

Si nous interrompions les deux tubulures allant au récipient et que nous les retirions du circuit nous pourrions alors constater une certaine pression à leurs extrémités. Cette pression est causée par la tension de la membrane. Le condensateur se comporte de façon analogue. Si on le retire du circuit il est chargé et présente une tension. Dans notre expérience nous avons égalisé la charge du condensateur en le court-circuitant avant la répétition d'une nouvelle expérience. L'étincelle produite à ce moment-là montrait l'égalisation de la charge.
Les compteurs d'eau ont mesuré la quantité de liquide tandis que les instruments ont indiqué le courant. Lorsque nous voulons estimer une *quantité d'électricité* nous devons multiplier le courant qui s'est écoulé par le temps pendant lequel ce courant s'est maintenu. Nous nous souvenons que le courant électrique est égal à la quantité d'électricité écoulée par unité de temps. Un courant électrique de 1 ampère correspond à l'écoulement, dans un conducteur, de $6{,}26 \cdot 10^{10}$ électrons par seconde. Par le terme de charge électrique, nous comprenons le nombre d'électrons ou charges élémentaires. Par charge élémentaire nous entendons la charge d'un seul électron. L'unité de la charge découle par conséquent du produit du courant par le temps:

Charge électrique = Courant fois le temps
Charge = Ampères fois secondes
$Q = I \cdot t$ (As ou coulomb)

Dans les formules le symbole de la charge est Q.
L'unité de mesure dans le système Giorgi est l'*ampèreseconde* (As) ou le *coulomb* (C). 1 coulomb = 1 As.

d. Le champ électrique

Dès que les plaques d'un condensateur sont soumises à une tension, des charges positives et négatives se font face. Ces charges exercent des forces l'une sur l'autre. L'espace dans lequel ces forces s'exercent se nomme *champ électrique*. On se souvient que de manière semblable les lignes de force du champ magnétique étaient les porteurs du champ
La figure 89 représente les lignes de force du champ électrique.

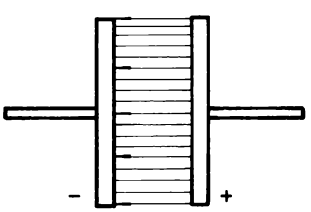


Figure 89

Les lignes de force sortent de la plaque positive et entrent sur la plaque négative. Le long de ces lignes de champ une chute de tension s'établit. La grandeur de cette chute de tension donne la mesure de l'intensité du champ électrique ou gradient de potentiel. Le gradient de potentiel est la tension par unité de longueur.
Puisque le gradient de potentiel est une grandeur ayant un sens, il peut être représenté par un vecteur. Dans les formules son signe est par conséquent: $\mathfrak{E}$ ou $\vec{E}$.
Afin de simplifier les raisonnements suivants nous supposons que le champ est homogène. De même, seules les valeurs des vecteurs seront prises en considération.
L'unité de mesure du gradient de potentiel est le V/m. Par contre, la cause du champ électrique est la charge. Sans charge, pas de champ et plus grande est la charge plus le champ est fort.
Pour une charge constante, plus la surface des plaques diminue plus le champ est dense. La *densité du champ électrique* indique la charge par unité de surface. Elle se rapporte à la charge par centimètre carré de surface de plaque.

Densité du champ électrique = Charge par unité de surface
[Densité] = Ampèreseconde par mètre carré

$$D = \frac{Q}{A} \quad \frac{\text{As}}{\text{m}^2}$$

Pour désigner la densité on utilise souvent le terme de « déplacement diélectrique ».
Nous savons maintenant que le condensateur est capable d'accumuler une charge électrique. L'expérience que nous avons faite nous a montré que la charge accumulée augmente avec la grandeur de la capacité. Nous ne nous sommes pas encore occupés des possibilités d'accumulation du condensateur si nous ne considérons pas de plus près la tension qui apparaît sur un condensateur chargé. Avant de porter notre attention sur ces deux grandeurs, nous allons examiner la relation qui existe entre la densité du champ et le gradient de potentiel. Nous nous représentons un condensateur constitué de deux plaques dont la grandeur et la distance entre elles peuvent être variées. Par conséquent, le condensateur présente une capacité déterminée. Nous donnons maintenant une certaine charge au condensateur, donc une certaine densité D s'établit. Le champ présente, maintenant, un gradient de potentiel E. Nous faisons s'écouler une charge supplémentaire sur le condensateur. Le gradient de potentiel ainsi que la densité augmentent. Puisque nous nous représentons le champ électrique comme des lignes de champ et que la charge est la cause du champ, il doit exister une relation entre la densité et le gradient de potentiel.
Cette relation est exprimée par le facteur de proportionnalité:

$$D = \varepsilon \cdot E$$

Le facteur ε (epsilon) signifie *constante diélectrique absolue* et se compose de :

$$\varepsilon = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r ; \; \varepsilon_o = 0{,}8855 \cdot 10^{-11} \frac{As}{V \cdot m}$$

ε_r = Constante diélectrique relative
ε_o = Constante diélectrique du vide

Lors de l'étude des phénomènes magnétiques, nous avons rencontré le facteur μ_o, ce facteur est une constante naturelle et sert de facteur de transposition d'un système de mesure dans l'autre. Le même rôle est dévolu à ε_o. L'unité de mesure pour ε_o résulte de l'équation suivante :

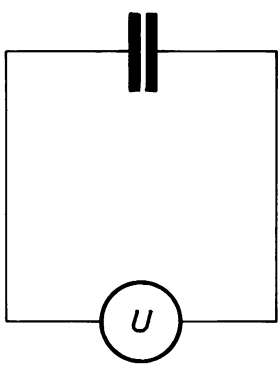
$$\varepsilon_o \cdot \varepsilon_r = \frac{D}{E}$$ nous vérifions l'équation des dimensions

$$[\varepsilon_o] = \frac{As}{m^2} \cdot \frac{m}{V} = \frac{As}{Vm}$$

La constante diélectrique absolue sera utilisée plus tard lors du calcul de la capacité.

e. Capacité d'un condensateur

La *capacité* d'un condensateur nous indique quelle est la grandeur de la charge qu'il peut accumuler pour une tension déterminée.
Au moyen d'un essai nous allons étudier ces relations. La figure 90 nous montre le schéma de principe de cet essai.



Voltmètre électrostatique
ou électromètre

Figure 90

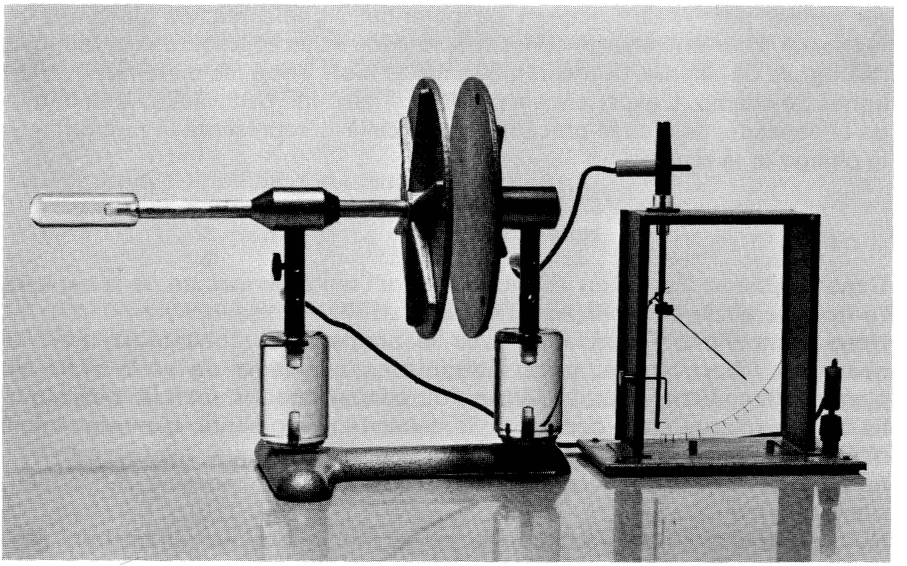


Figure 91

La figure 91 nous montre le montage de l'expérience. Un condensateur à plaques est chargé avec un bâton d'ébonite frotté. En frottant le bâton avec un chiffon, une charge électrique s'accumule sur lui. Cette charge est alors transférée au condensateur en touchant une plaque avec le bâton. Du fait de cette charge, un champ électrique ayant un gradient de potentiel déterminé s'établit entre les plaques du condensateur. La tension qui s'établit entre les plaques est mesurée avec un *électromètre*. L'électromètre possède une résistance interne pratiquement infinie, il ne consomme aucune puissance. Il travaille selon le principe de l'attraction et de la répulsion sous l'effet d'un champ électrique.
Le condensateur ne peut pas se décharger à travers l'instrument puisque ce dernier se comporte comme un isolateur.
Le condensateur sera chargé suffisamment pour que l'électromètre indique une déviation de la moitié de son échelle. Maintenant, la distance entre les plaques est lentement augmentée et simultanément la déviation de l'électromètre augmente. Lorsque la distance entre les plaques diminue, la tension de l'électromètre baisse également. L'expérience peut se répéter à volonté avec la même charge.
Lorsque le processus de charge du condensateur est terminé, ce dernier conserve la charge reçue à une valeur constante. Dans notre expérience, la surface des plaques étant fixe, la densité comme aussi le gradient de potentiel

ne varient pas. Mais, gradient de potentiel signifie tension par unité de longueur. Pour une charge constante, lorsque nous augmentons la longueur des lignes de champ, la tension augmente alors entre les extrémités de ces lignes de champ. L'expérience a prouvé ce raisonnement. Selon la définition de la capacité, déjà citée précédemment, celle-ci représente le rapport entre la charge et la tension.

$$\textbf{Capacité} = \frac{\textbf{charge}}{\textbf{tension}} \; ; \; \mathbf{C} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{U}} \; ; \; [\mathrm{C}] = \mathrm{As/V} \text{ ou } \textbf{farad (F)}$$

Dans le système Giorgi, on utilise donc pour l'unité de mesure de la capacité l'ampèreseconde par volt (As/V) ou le farad (F).
Nous complétons l'expérience avec le condensateur chargé et, tout en observant l'électromètre, nous introduisons une lame de verre entre les plaques du condensateur. La tension du condensateur s'abaisse. Cela signifie que, la charge étant constante, la capacité a augmenté. L'enseignement que nous tirons de cette expérience est le suivant : lorsque, à la place de l'air, nous utilisons un meilleur isolant comme diélectrique, la capacité du condensateur augmente.
Nous voulons maintenant découvrir les relations entre les dimensions géométriques du condensateur et la grandeur de sa capacité. L'expérience que nous venons de voir nous a déjà fourni deux facteurs déterminant la capacité :
1. Pour une charge constante la tension du condensateur monte si l'on augmente la distance entre ses plaques. De plus, nous avons constaté que la capacité est une fonction de la charge par rapport à la tension. Il s'ensuit que la capacité diminue lorsque la distance augmente entre les plaques du condensateur. *La capacité varie de façon inversement proportionnelle à la distance entre les plaques.*
2. Lors de la même expérience nous avons vu que, pour une charge toujours constante du condensateur sa tension baisse lorsqu'un meilleur isolant que l'air est introduit entre ses plaques. Nous en avons conclu que la capacité avait augmenté. Le facteur d'augmentation de la capacité, dû à l'emploi d'un matériau déterminé comme diélectrique, se nomme *constante diélectrique relative* ε_r. C'est un facteur de proportionnalité sans dimension.

La capacité varie proportionnellement avec la constante diélectrique relative.

3. Nous pouvons facilement déduire des expériences précédentes et de nos raisonnements que lorsque la surface des plaques augmente – la charge restant constante – la densité du champ électrique diminue. Mais cependant, comme la densité et le gradient de potentiel sont liés avec la constante diélectrique et que les deux grandeurs se comportent de manière proportionnelle l'une envers l'autre, le gradient de potentiel diminue lorsque la surface des plaques augmente. Une diminution du gradient de potentiel pour une charge constante, a la même signification que la diminution de tension au condensateur ce qui revient à dire que la capacité a augmenté.

La capacité varie proportionnellement avec la surface des plaques.
Nous allons déterminer l'influence de la constante diélectrique au moyen de l'algèbre. Nous savons que la densité du champ électrique est liée au gradient de potentiel par la constante diélectrique.

$$D = \varepsilon E$$

Nous posons l'équation déterminant la densité :

$$D = \frac{Q}{A}$$

La relation suivante existe entre le gradient de potentiel et la tension au condensateur :

$$E = \frac{U}{d}$$

Par conséquent, nous pouvons écrire :

$$\frac{Q}{A} = \frac{\varepsilon \cdot U}{d} \; ; \text{ et ainsi } Q = U \cdot \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$$

Puisque $C = \frac{Q}{U}$ on obtient également :

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$$

Puisque ε se compose de ε_o et de ε_r, la formule complète donne :

$$C = \frac{\varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d} \; ; \; [C] = \frac{\text{As} \quad \text{m}^2}{\text{Vm} \quad \text{m}} = \frac{\text{As}}{\text{V}} \text{ ou F}$$

Cette unité est bien trop grande pour indiquer la valeur des condensateurs ordinaires. Les unités suivantes sont utilisées dans la pratique courante :

$1\ \mu\text{F} = 1 \cdot 10^{-6}$ F (microfarad)
$1\ \text{nF} = 1 \cdot 10^{-9}$ F (nanofarad)
$1\ \text{pF} = 1 \cdot 10^{-12}$ F (picofarad)

f. Genres de réalisations

Le condensateur à plaques

Il se compose de plusieurs paires de plaques reliées en parallèle. En général, le diélectrique utilisé est de l'air. Les condensateurs à plaques sont très souvent employés dans les étages de puissance des émetteurs. La figure 92 nous montre une exécution d'un condensateur à plaques.

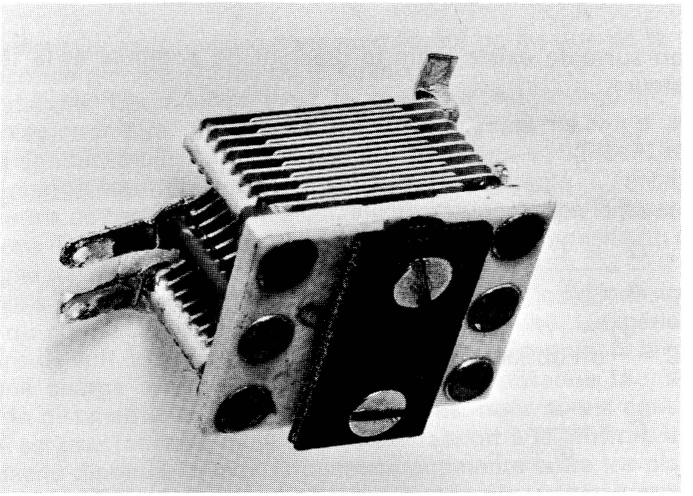


Figure 92

Le condensateur variable

Il se compose de deux paquets de plaques dont l'un est mobile sur un axe. Par la rotation du paquet de plaques mobiles, la capacité varie de façon continue. Le paquet mobile s'appelle le rotor, les plaques fixes forment le stator. Les condensateurs variables trouvent leur principale application dans les émetteurs et dans les récepteurs, où ils servent à accorder les circuits oscillants. La forme des plaques a une influence sur la division de l'échelle des fréquences des appareils. Par le choix judicieux de la forme des plaques il est possible de réaliser des échelles linéaires en fréquence. Les condensateurs variables sont construits en modèles élémentaires ou réunis en systèmes ; on parle alors de condensateurs multiples. Dans des condensateurs, tous les rotors sont réunis sur le même axe. Le nombre des condensateurs élémentaires par système et la forme de leurs plaques dépendent de l'appareil pour lequel le condensateur est destiné.

La figure 93 nous montre un condensateur variable élémentaire et un condensateur double. La capacité des condensateurs variables commence

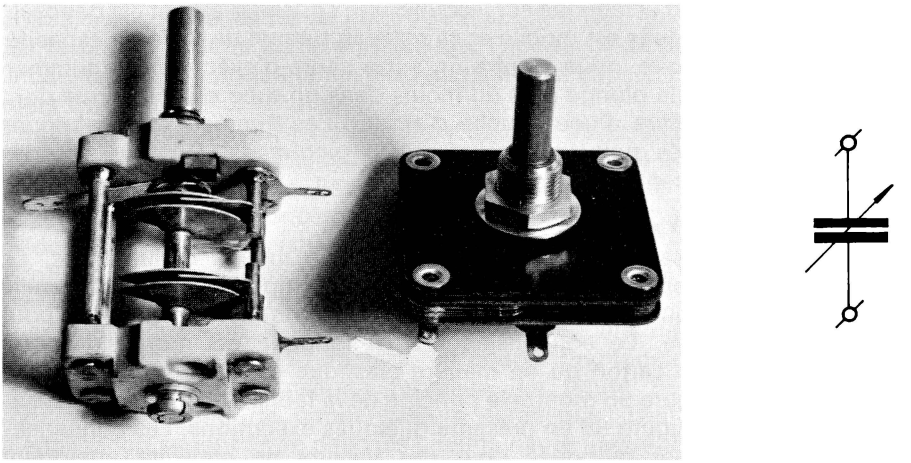


Figure 93

avec quelques picofarads pour atteindre quelques centaines de picofarads. Sur la droite de l'image nous voyons le symbole d'un condensateur variable.

Le condensateur trimmer ou simplement : trimmer

Le trimmer est un condensateur ajustable. Sa capacité est variable de façon continue. Le trimmer est utilisé pour l'alignement des circuits et des condensateurs variables multiples. On distingue plusieurs formes d'exécution.

Le trimmer à air est construit soit comme un condensateur variable en miniature ou se présente sous la forme d'un condensateur plongeant comme le montre la figure 94, à droite. Il existe une autre sorte de trimmer composé

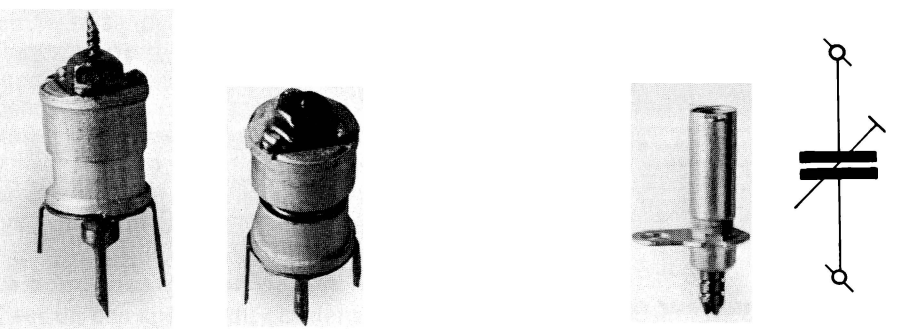


Figure 94

de deux disques en céramique sur lesquels une couche d'argent est déposée. L'un des deux disques est mobile et sa rotation permet de varier la capacité. La figure 94, à droite, nous montre un autre genre d'exécution de trimmer. Une tige hélicoïdale plonge plus ou moins dans un tube en céramique dont la surface est revêtue d'une couche d'argent. Les trimmers sont fabriqués pour des capacités pouvant atteindre 100 picofarads. De plus grandes capacités sont exceptionnelles.

Le condensateur enroulé

Dans ce condensateur les électrodes sont des rubans d'aluminium. Le diélectrique est constitué d'une feuille de papier imprégné ou d'une feuille de matière plastique. Les électrodes et le diélectrique sont enroulés pour former un cylindre. Le condensateur ainsi fabriqué est monté dans un boîtier en tôle, en carton ou en matière plastique et scellé par une résine synthétique. La figure 95 montre le principe de la fabrication d'un condensateur enroulé et la figure 96 en présente quelques exécutions. Les condensateurs enroulés sont fabriqués pour des valeurs de capacité atteignant quelques μF. Ils sont principalement utilisés dans les circuits basse fréquence.

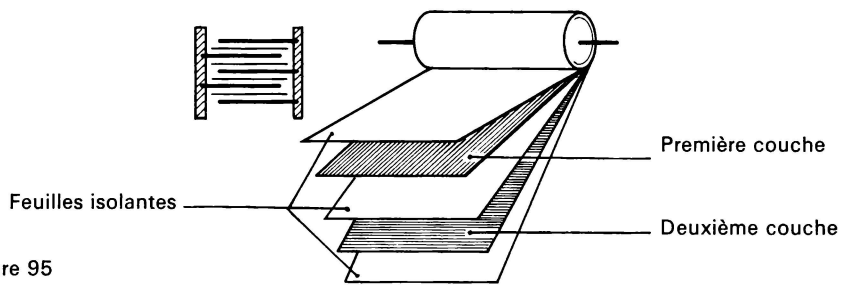


Figure 95

CONDENSATEURS ENROULÉS

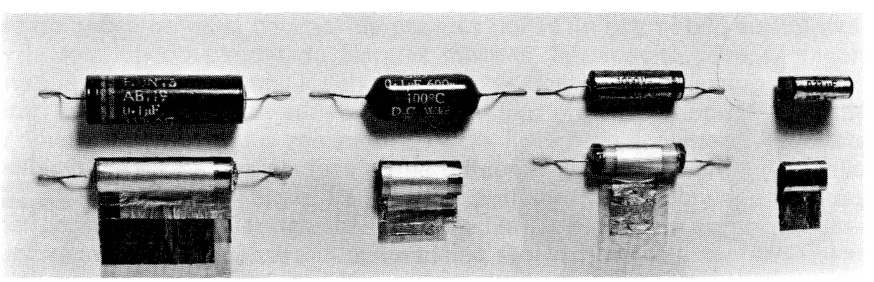


Figure 96

Le condensateur céramique

Ce genre de condensateur existe en deux exécutions principales :
Condensateurs plats ou *condensateurs en forme de disque:* un mince disque en céramique présente sur ses deux faces une couche d'argent, déposée à

chaud, sur laquelle les fils de liaison sont soudés. La capacité est déterminée par la grandeur de la surface métallisée, l'épaisseur de la céramique et par la constante diélectrique relative du matériau. La capacité de ces condensateurs varie entre 1 et 50 pF.
Condensateurs tubulaires ou *en forme de tige:* ils se composent d'un petit tube en céramique où une couche d'argent est déposée à chaud à l'intérieur et à l'extérieur des parois. Les fils de liaison sont soudés avec chacune des couches. En ce qui concerne leur capacité se référer à ce qui a été dit ci-dessus. Ces condensateurs sont fabriqués pour des capacités allant de 10pF à quelques milliers de pF.
Les condensateurs céramique sont recouverts d'une laque protectrice dont la couleur indique en général le coefficient de température (différentes selon le fabricant). La figure 97 montre, en coupe longitudinale, le principe de fabrication d'un condensateur tubulaire. La figure 98 montre diverses formes d'exécution de condensateurs céramique. Leur principal champ d'application se rencontre dans les circuits haute fréquence.

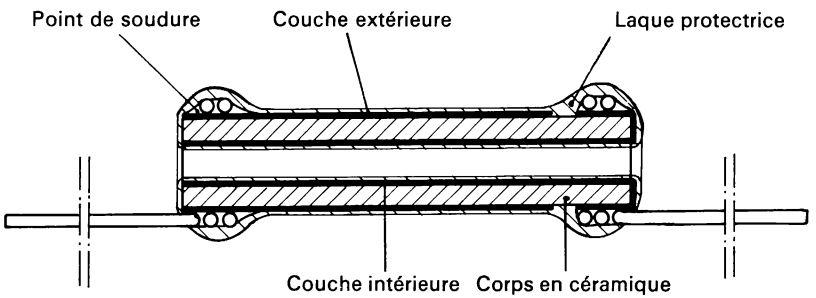


Figure 97

Le condensateur au mica
Ici, le mica est utilisé comme diélectrique. Les deux côtés de la mince plaquette de mica sont métallisés. Selon les besoins et pour augmenter la capacité, plusieurs plaquettes sont empilées les unes sur les autres en y insérant des feuilles métalliques pour assurer le contact. Ces condensateurs sont normalement enrobés et pressés dans une matière plastique et sont utilisés comme condensateurs de précision ayant une constance élevée dans les instruments de mesure et dans les circuits haute fréquence. Ils existent avec des capacités d'environ 30 pF jusqu'à quelques milliers de pF.

Le condensateur au papier métallisé MP
C'est un cas spécial du condensateur enroulé. Le composant de ce genre de condensateur est du papier qui reçoit, sur chacune de ses faces, un mince dépôt métallique par évaporation.
Les rubans de papier métallisé sont enroulés pour former un condensateur.

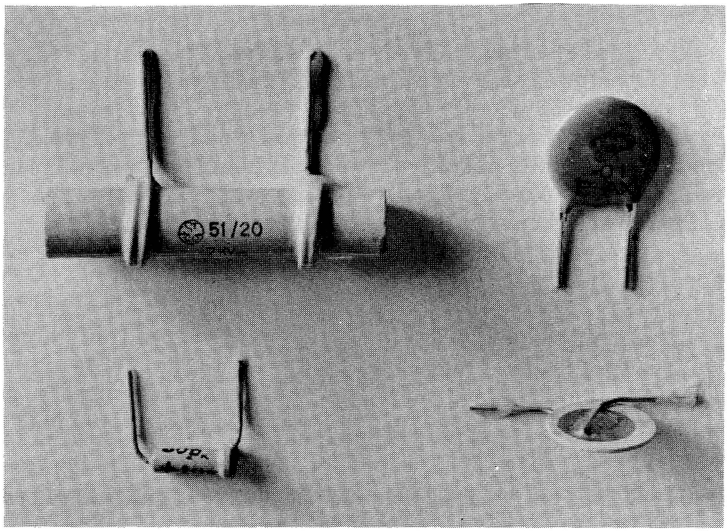


Figure 98

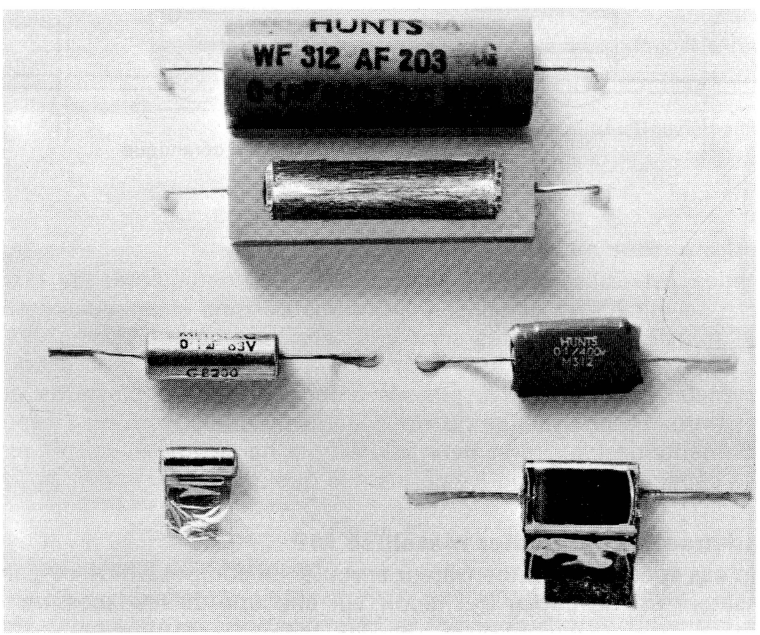


Figure 99

L'avantage de ce genre de condensateur réside dans ses dimensions réduites par rapport à sa capacité. Lors d'une perforation de l'isolation, par la tension, le dépôt métallique brûle autour de la perforation ainsi le condensateur se « guérit » de lui-même. Les condensateurs MP sont principalement utilisés comme cellules de filtrage dans les circuits redresseurs et dans les appareils basse fréquence. Ils sont fabriqués avec des capacités dépassant 100μF. La figure 99 nous en montre quelques formes d'exécution.

Le condensateur électrolytique

Il se compose d'une électrode métallique, dont la surface est augmentée par des ondulations ou tout autre traitement, qui est plongée dans un électrolyte. L'une des électrodes est représentée par le métal, l'autre par l'électrolyte. Dès qu'une tension continue de polarité correcte est appliquée aux électrodes, une mince couche d'oxyde se forme sur la surface du métal et représente le diélectrique. Cette couche étant très mince – de l'ordre de $1 \cdot 10^{-5}$ cm – une très grande capacité s'obtient dans un petit volume. Dans les condensateurs nommés « électrolytiques secs » l'électrolyte se compose d'une gelée électrolytique. En vieillissant, les condensateurs électrolytiques perdent leur capacité (l'électrolyte devient sec) et pour cette raison ils doivent être remplacés, selon les besoins, dans les vieux appareils. La résistance d'isolation des condensateurs électrolytiques n'est pas si bonne que celle des autres condensateurs. Pour maintenir et renouveler sa couche d'oxyde le condensateur électrolytique a besoin d'un faible courant. Ce courant est de l'ordre de 0,01 mA par μF. Les possibilités d'emploi des condensateurs électrolytiques sont très limitées à cause de leurs propriétés spéciales. Ils ne peuvent être utilisés que sous une tension continue et ne supportent pas une trop grande tension alternative superposée. Dans tous les circuits comportant des condensateurs électrolytiques, il faut prendre garde à la polarité. Si un condensateur électrolytique est mal polarisé sa destruction se produira dans un court laps de temps. C'est pour cette raison que ce genre de condensateur est employé en premier lieu dans les circuits des redresseurs comme condensateur de filtrage et dans les circuits basse fréquence comme condensateur de « lissage » (filtrage). La technique des transistors a considérablement augmenté son domaine d'utilisation car on le rencontre dans la plupart des circuits basse fréquence à transistors comme condensateur de couplage. Les condensateurs électrolytiques sont fabriqués avec des capacités de 1000 μF et plus (capacité équivalente de la Terre = 630 μF). Les condensateurs de grande capacité se fabriquent principalement pour de basses tensions.

La figure 100 nous montre la construction de principe d'un condensateur électrolytique tandis que la figure 101 présente diverses formes d'exécution de condensateurs à électrolyte sec.

Nous n'avons pas parlé des condensateurs électrolytiques *bipolaires* qui ne présentent, pour une tension donnée, que la demi-capacité par unité de volume ; mais en revanche, il n'est plus nécessaire d'observer la polarité pour ce genre de condensateur.

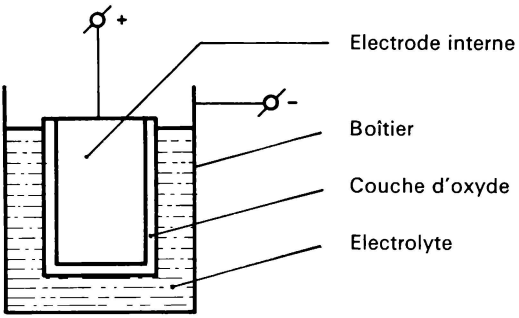


Figure 100

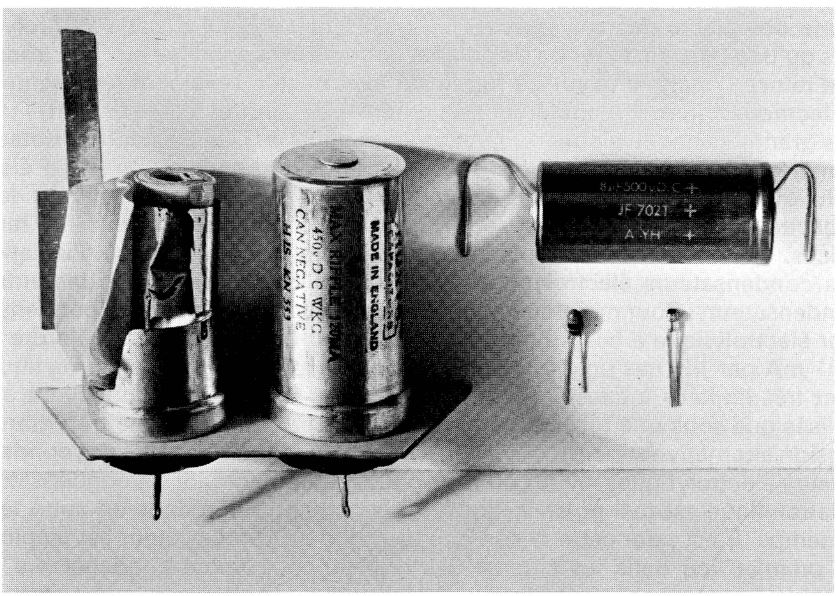


Figure 101

En bas à droite de la figure 101, deux condensateurs électrolytiques au tantale sont représentés.

g. Caractéristiques

Le condensateur est caractérisé par la *valeur de sa capacité*, le *facteur de pertes*, le *coefficient de température*, la *tension de service et d'essai* et l'*inductance propre.*

La constante diélectrique relative ε_r

La capacité d'un condensateur est déterminée par ses dimensions géométriques et le diélectrique. Dans le tableau 12, la constante diélectrique relative des matériaux les plus importants est représentée.

Matériau	Constante diélectrique relative
Calite	6 6,5
Verre	2 16
Mica	4 4
Air	1,000594
Pertinax	4,8
Plexiglas	3 4,5

Tableau 12

Le facteur de perte tg δ

Les pertes dans un condensateur ont trois causes, les pertes dans le diélectrique, les pertes dues au défaut d'isolation et les pertes ohmiques. Ce sont les pertes dans le diélectrique qui jouent le rôle principal. Par *pertes dans le diélectrique* nous entendons la puissance électrique transformée en chaleur dans le diélectrique du condensateur lorsque celui-ci est relié à une tension alternative. L'échauffement du diélectrique a son origine dans le mouvement des atomes et des molécules soumis à l'influence du champ électrique alternatif. Pour une tension constante, l'importance de la puissance perdue dépend des propriétés du diélectrique. Les pertes dépendent de la fréquence et croissent lorsque celle-ci augmente. Ce fait est facilement compréhensible si l'on se représente que les molécules et les atomes du diélectrique se déplacent au rythme de la fréquence de la tension appliquée. Les *pertes par défaut d'isolation* font également partie du facteur de pertes, cependant pour de bons condensateurs elles y participent dans une mesure extrêmement faible. Pour terminer, *les pertes ohmiques* dans les fils d'amenée et sur les plaques doivent encore être mentionnées quoique leur participation au facteur de pertes est également extrêmement faible. On peut se figurer toutes ces pertes réunies comme des résistances en série ou en parallèle. Plus la résistance des pertes en parallèle est élevée plus faibles sont les pertes. Dans le cas de la résistance des pertes en série la situation est inversée, plus la résistance des pertes en série est élevée plus grandes sont les pertes. Le fait de devoir travailler avec des résistances de pertes en série ou en parallèle dépend du circuit dans lequel le condensateur est en service. Nous verrons plus tard que les deux modes de représentation sont d'égale valeur. Nous rencontrerons, pour de nombreux problèmes de technique des courants alternatifs, le principe selon lequel les diverses résistances de pertes doivent être réunies en une résistance de perte série ou parallèle.

La figure 102 montre les deux schémas équivalents d'un condensateur chargé de ses pertes.

Les pertes, dans un condensateur, peuvent se mesurer par des moyens techniques. Pour chaque condensateur le facteur de pertes tg δ peut se mesurer.

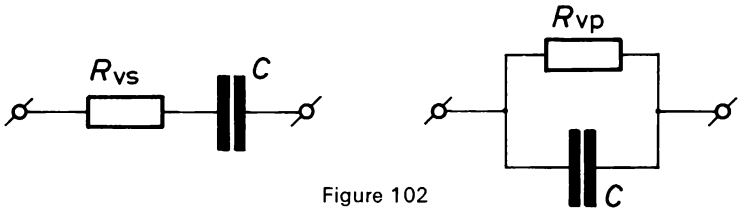


Figure 102

Cette mesure des pertes dépend du diélectrique utilisé. Les pertes dans les condensateurs jouent un rôle primordial dans les circuits à courant alternatif. Nous apprendrons, dans un chapitre ultérieur, comment se calcule le facteur de pertes d'un condensateur. Le tableau 13 indique le facteur de pertes de quelques matériaux.

Matériau	tg δ	Fréquence de mesure
Papier	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$	3 kHz
Feuille de matière plastique	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$	100 kHz
Mica	$0{,}3 \cdot 10^{-3}$	1 MHz
Céramique	$0{,}4 \cdot 10^{-3}$	1 MHz

Tableau 13

Le coefficient de température (TK_c ou α_c)

La capacité des condensateurs dépend de la température. Cette dépendance de la température est exprimée par le coefficient de température, il nous indique de combien varie la capacité d'un condensateur pour un changement de température d'un degré Celsius. La variation de capacité peut être positive ou négative selon le matériau employé pour le diélectrique. Le tableau 14 nous montre quelques coefficients de température des matériaux les plus employés.

Le coeficient de température occasionne le plus de perturbations dans les circuits où un condensateur a pour fonction de fixer une fréquence. En assemblant de façon judicieuse des condensateurs dont les coefficients de température sont positifs et négatifs il est possible d'obtenir des ensembles dont la capacité est indépendante de la température.

Matériau	Coefficient de température α_c
$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C} \Big/ \Delta t$ par 1° C	
Calite	+120 ..... $+160 \cdot 10^{-6}$
Mica	+ 60 ..... $+100 \cdot 10^{-6}$
Tempa S	+ 30 ..... $+ 50 \cdot 10^{-6}$
Tempa N	− 20 ..... $- 40 \cdot 10^{-6}$
Condensa N	−340 ..... $-380 \cdot 10^{-6}$
Condensa C	−700 ..... $-740 \cdot 10^{-6}$

Tableau 14

La tension de service

La *tension de service* d'un condensateur est celle qui peut lui être appliquée pour un fonctionnement normal. *En règle générale, les tensions de service sont des valeurs de tension continue.* Dans un circuit à courant alternatif, il faut donc prendre garde à ce que la tension de service du condensateur soit choisie suffisamment élevée pour que la valeur de pointe de la tension alternative ne dépasse pas la tension de service. Si la tension de service est indiquée en tension alternative il est entendu par là qu'il s'agit de la valeur effective d'une tension sinusoïdale.
Il arrive souvent que la *tension d'essai* soit aussi imprimée sur les condensateurs. Il peut s'agir d'une tension d'essai continue ou alternative. Si pour l'essai une tension alternative est utilisée, c'est la valeur effective qui est alors indiquée.

L'inductance propre

L'*inductance propre* d'un condensateur a sa source dans l'inductance des fils d'amenée (de liaison) et dans celle des électrodes. Par inductance on entend les propriétés électriques de bobines. Chaque condensateur possède, dans de faibles mesures, les propriétés d'une bobine. Pour les condensateurs enroulés, cet enroulement agit comme une bobine pour autant que de chaque côté une couche ne dépasse pas et ne soit soudée avec les fils d'amenée de façon à ne former qu'un bloc lors du soudage. Un condensateur fabriqué de cette façon utilise le même principe que le trimmer plongeant (dénommé condensateur enroulé à faible inductance). De cette manière la part de l'inductance propre est si faible qu'elle ne commence à jouer un rôle important que dans la gamme des ondes ultracourtes.

h. Le comportement en travail des condensateurs

Le condensateur dans le circuit à courant continu

Le comportement en courant continu est étudié en réalisant une expérience. Nous construisons un montage selon la figure 103.

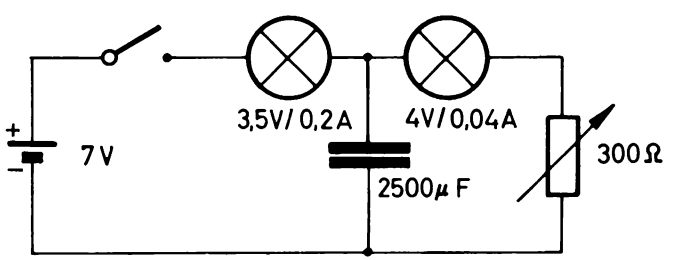


Figure 103

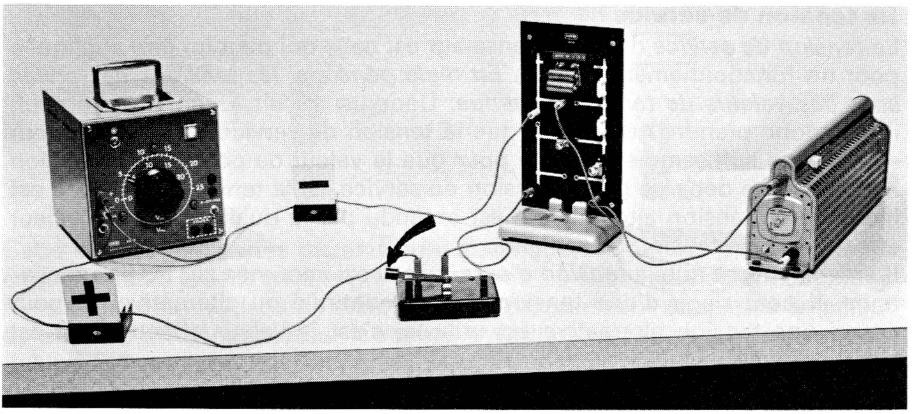


Figure 104

La figure 104 nous montre la réalisation de l'expérience.
Le condensateur de 2500 μF est chargé à travers la lampe de 3,5 V/0,2 A. Le courant de charge est indiqué par cette lampe. La lampe de contrôle de 4 V/0,04 A indique la tension du condensateur. La résistance variable est réglée de façon à ce que la lampe éclaire normalement pour la pleine tension. L'indicateur de tension utilisé est donc une lampe qui consomme cinq fois moins de courant que la lampe indicatrice de la charge. Grâce à cette mesure on empêche que le courant qui passe à travers la lampe la plus faible ne soit indiqué par la lampe de charge.
Lorsque l'interrupteur à levier est basculé, la lampe de 3,5 V/0,2 A indique instantanément le passage d'un courant tandis que la deuxième lampe ne s'allume que bien plus tard.
Cette expérience montre que lors de la fermeture du circuit de charge un courant s'écoule aussitôt. Ce courant de charge atteint sa valeur maximale au moment de l'enclenchement et diminue ensuite jusqu'à la valeur zéro. Dans le même laps de temps la tension aux bornes du condensateur passe de la valeur zéro à la valeur maximale.
Un exemple se référant à la mécanique va nous aider à visualiser ce processus électrique. Nous nous représentons une petite bouteille vide de gaz. Pour remplir cette petite bouteille de gaz, nous disposons d'un compresseur ayant une pression constante. La petite bouteille de gaz est l'homologue de notre condensateur, le compresseur représente la source de tension. Si nous relions, maintenant, la bouteille de gaz vide au compresseur, un fort courant de gaz s'écoule au premier instant puis diminue avec le temps jusqu'à ce que la même pression règne dans la bouteille de gaz, égale à celle dans le compresseur. La pression, dans la bouteille de gaz était nulle au moment de son raccordement au compresseur et augmenta jusqu'à ce que l'équilibre des pressions fut établi.

Dans la pression du gaz nous reconnaissons la tension et dans le débit de gaz le courant électrique.
Nous résumons le résultat de l'expérience :
En appliquant une tension continue à un condensateur le courant de charge diminue d'une valeur maximale à zéro. Pendant ce temps, la tension au condensateur augmente de zéro pour atteindre sa valeur maximale.

Le courant de charge précède la tension dans le condensateur.

L'association des condensateurs en parallèle

La prochaine expérience nous montre le comportement des condensateurs lors de leur mise en parallèle. La figure 105 nous indique le schéma du montage et la figure 106, la photo de la disposition des éléments du circuit.

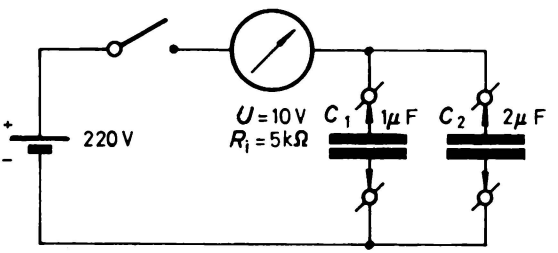


Figure 105

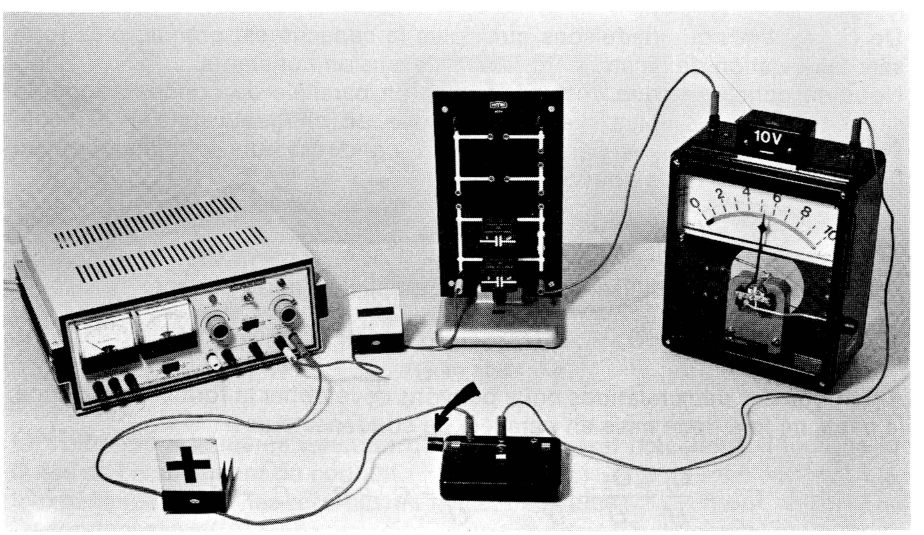


Figure 106

Les condensateurs C_1 et C_2 peuvent être, au choix, reliés seuls ou en parallèle à travers le voltmètre pour les charger. Le voltmètre possède une résistance interne de 5 k-ohms. La résistance interne sert de limiteur de courant car, au moment de l'enclenchement, seule la résistance interne de la source de tension limite le courant. Par conséquent, la déviation du voltmètre donne une indication du temps d'écoulement du courant.
L'expérience donne les résultats de mesure suivants :
La charge du condensateur C_1, 1 μF, donne une certaine déviation.
La charge du condensateur C_2, 2μF, donne une plus grande déviation.
La charge des deux condensateurs, mis en parallèle, donne la plus grande déviation.
Avant chaque mesure les condensateurs ont été déchargés.
Le résultat des mesures est à la base des constatations suivantes :
La déviation donne une mesure de la capacité du condensateur car la tension de la source est restée constante pendant tous les essais. La formule qui donne la relation entre la charge, la tension et la capacité s'exprime par :

$$Q = C \cdot U, \text{ la formule transposée pour } C \text{ donne } C = \frac{Q}{U}$$

en remplaçant Q par $I \cdot t$, C devient :

$$C = \frac{I \cdot t}{U}$$

De ce résultat nous déduisons que : plus la capacité est grande, plus forte sera la déviation de l'instrument pour une tension constante.
Nous en concluons que, lors de la mise en parallèle de condensateurs, la capacité totale est plus grande que celle de chaque capacité partielle. Puisque, par leur mise en parallèle, tous les condensateurs sont chargés avec la même tension nous pouvons écrire :

$$U_1 = U_2 = U_3 = \ldots U_n = U$$

Les charges des condensateurs reliés en parallèle s'additionnent

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots Q_n = Q_{tot}$$

A partir de ces deux relations nous pouvons développer la formule qui donne la capacité lors de la mise en parallèle de condensateurs :

$$C_{tot} = \frac{Q_1}{U} + \frac{Q_2}{U} + \frac{Q_3}{U} + \ldots \frac{Q_n}{U} = C_1 + C_2 + C_3 + C_n$$

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots C_n$$

Nous résumons le résultat de l'expérience :
La capacité totale de condensateurs reliés en parallèle est égale à la somme des capacités partielles.

L'association en série des condensateurs

L'essai suivant nous montre le comportement de condensateurs reliés en série. La figure 107 indique le schéma de l'expérience.

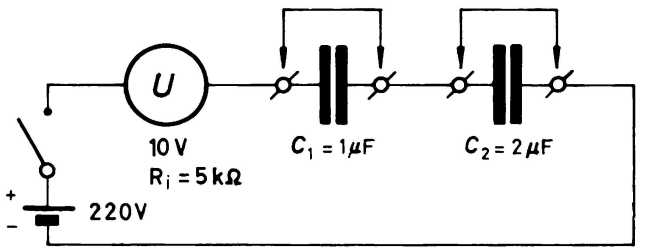


Figure 107

La figure 108 montre la réalisation de l'essai.

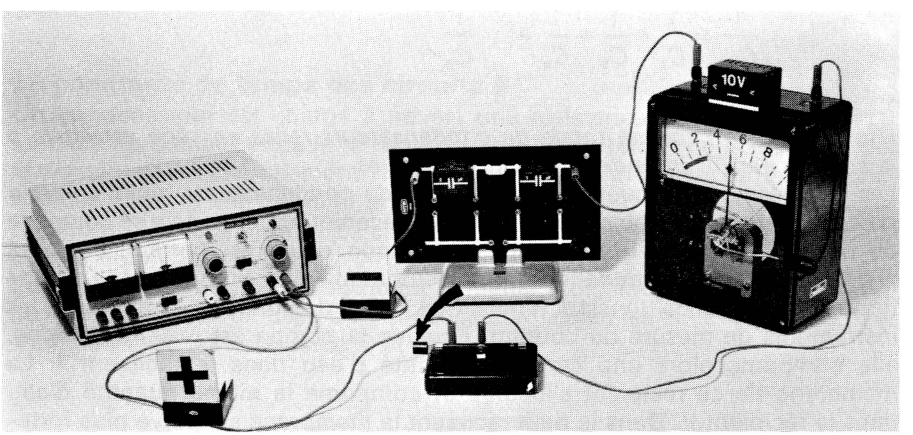


Figure 108

Le voltmètre a la même fonction que lors de l'essai précédent, il indique la durée de l'écoulement du courant.
L'expérience donne les résultats de mesure suivants :
Le condensateur C_1 (1 μF) occasionne une certaine déviation de l'instrument lors de sa charge.

Le condensateur C_2 (2 μF) montre une déviation un peu plus forte.
Les condensateurs sont reliés en série et chargés à nouveau, la déviation mesurée est maintenant plus faible.
Avant chaque mesure les condensateurs ont été déchargés.
Les résultats des mesures et quelques raisonnements conduisent au développement de la formule donnant la capacité de condensateurs reliés en série. Nous partons du fait que, pour des condensateurs reliés en série, chaque condensateur reçoit la même charge car il a été chargé pendant le même temps et avec le même courant. La somme des tensions de chaque condensateur donne la tension totale. Ces deux notions sont formulées de façon plus claire au moyen de l'algèbre :

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \ldots Q_n \qquad U_1 + U_2 + U_3 + \ldots U_n = U_{tot}$$

Les deux relations peuvent se transformer :

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} \; ; \; U_2 = \frac{Q}{C_2} \; ; \; U_3 = \frac{Q}{C_3} \; ; \; U_n = \frac{Q}{C_n} \; ; \; U_{tot} = \frac{Q}{C_{tot}}$$

En transformant nous obtenons :

$$\frac{Q}{C_{tot}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \ldots \frac{Q}{C_n}$$

Si nous divisons cette équation par Q, nous obtenons alors :

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots \frac{1}{C_n}$$

Nous résumons :
L'inverse de la capacité totale de condensateurs reliés en série est égale à la somme des inverses des capacités partielles.
Les processus électriques dans un circuit de condensateurs reliés en série peuvent s'étudier au moyen d'un modèle mécanique. Ce modèle se compose de deux récipients reliés en série où chacun d'eux est partagé en deux chambres de même grandeur par une membrane en caoutchouc. Une pompe figure la source de tension tandis que deux débitmètres remplacent les instruments de mesure du courant. Lorsque la pompe est mise en marche, elle comprime alors une certaine quantité d'eau dans le récipient I. La membrane de ce récipient s'incurve et comprime la même quantité d'eau dans le récipient II. Dans le petit récipient la membrane s'incurve plus fortement. La quantité d'eau comprimée s'écoule à travers le débitmètre I et revient à la pompe. Les deux débitmètres indiquent la même quantité. Reporté dans le circuit composé de condensateurs cela signifie que les deux condensateurs, indépendamment de leur capacité, ont prélevé la même charge. La membrane du petit récipient s'incurve plus fortement, elle est donc plus fortement tendue. Nous remarquons le même effet avec les condensateurs en ce sens que le petit condensateur présente une tension plus élevée que le grand.

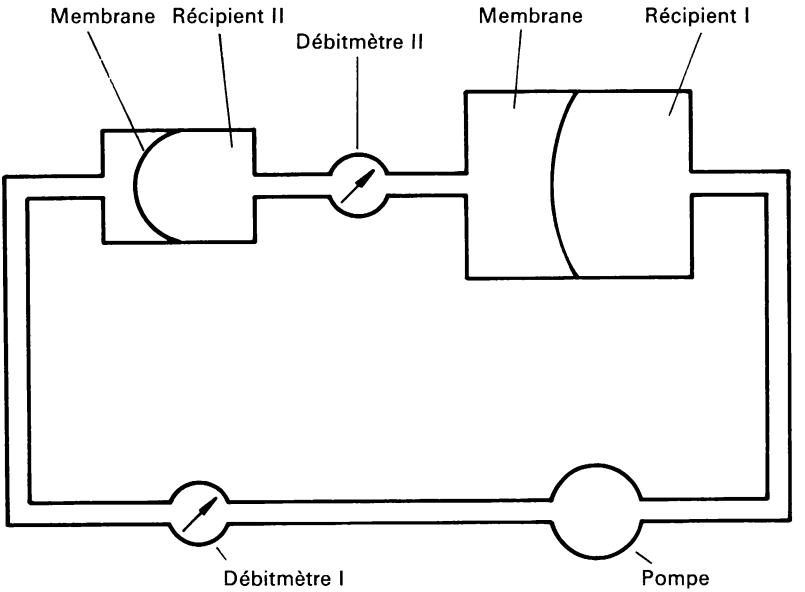


Figure 109

La constante de temps des circuits RC

Un condensateur est chargé à travers une résistance, selon la figure 110. Le tracé du courant et de la tension par rapport au temps nous intéresse dès le moment de l'enclenchement. Nous savons déjà qu'à l'instant de l'enclenchement le courant est maximal et que la tension au condensateur est nulle. La figure 111 nous montre les courbes du courant et de la tension lors de la charge d'un condensateur.

La forme de la courbe est toujours la même indépendamment de la valeur de la résistance et de celle du condensateur, seules les échelles sur les axes changent avec les valeurs de R et de C.

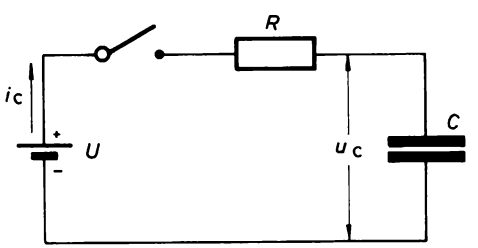


Figure 110

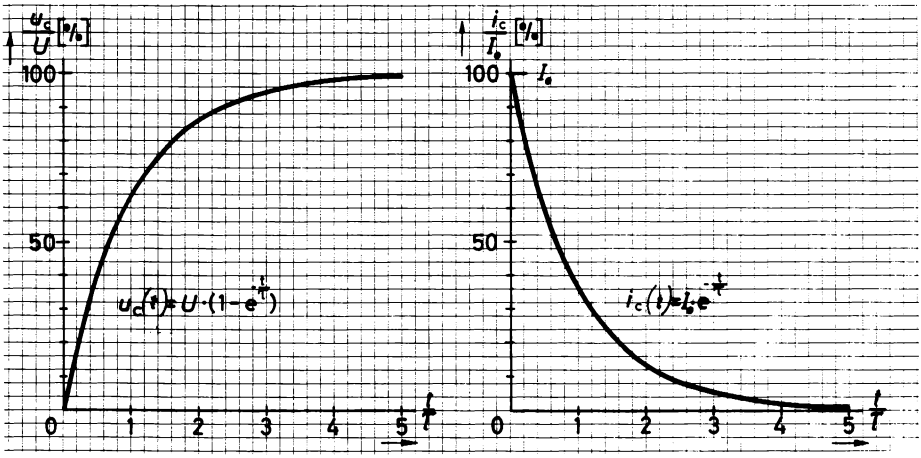


Figure 111

Les courbes dessinées sont celles d'une fonction exponentielle. Ce nom provient des mathématiques et signifie que la courbe de l'image appartient à une équation exponentielle. De tous les calculs réellement compliqués, qui peuvent être effectués sur une telle courbe, seuls quelques faits simples nous intéressent.

Si le courant de charge conservait son intensité de départ alors le condensateur serait complètement chargé dès que la tangente, de la figure 112, aurait atteint la valeur de 100%. Le courant de charge est proportionnel à la différence de tension entre la tension de la batterie et la tension au condensateur. Il est limité par la résistance R. Lorsque la charge augmente la différence entre la tension de la batterie et celle du condensateur diminue, ce qui a pour conséquence que le courant de charge diminue également. Ce sont les raisons pour lesquelles le courant et la tension n'ont pas une caractéristique linéaire.

Dans les circuits comprenant des condensateurs, une notion importante est celle de la constante de temps. Par cela il faut entendre le temps pour lequel le condensateur serait complètement chargé si la valeur de début du courant de charge serait maintenue constante.

Il ressort de la figure 112, que le condensateur après l'expiration d'une constante de temps est chargé à 63% de la tension de la batterie. Théoriquement, la tension au condensateur n'atteint jamais la tension de la batterie mais pour la pratique nous pouvons cependant simplifier et dire que le condensateur est chargé après 5 constantes de temps.

La constante de temps correspond au produit de la résistance de charge par la capacité.

$$\tau = C \cdot R\,;\ [\tau] = \mathrm{s} = \frac{\mathrm{A \cdot s}}{\mathrm{V}} \cdot \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}$$

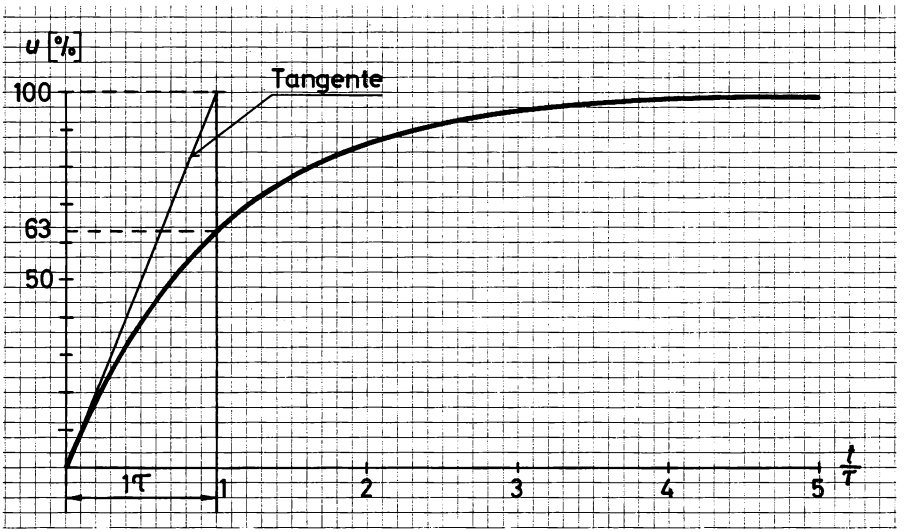


Figure 112

Le condensateur dans le circuit à courant alternatif

L'expérience suivante nous montre le comportement du condensateur dans le circuit à courant alternatif. La figure 113 indique le schéma et la figure 114 la disposition pour l'essai.

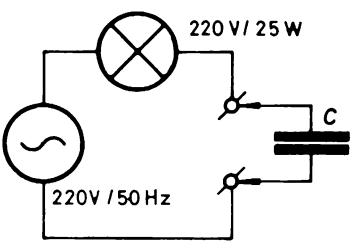


Figure 113

Dans le circuit à courant alternatif, des capacités de 2 μF, 4 μF, 6 μF, 8 μF et 10 μF sont successivement introduites. Avec l'augmentation de la capacité la lampe éclaire toujours plus.

D'après les observations déjà effectuées nous concluons que le condensateur représente une résistance pour le courant alternatif et que cette résistance diminue lorsque la capacité augmente.

A nouveau un modèle mécanique nous aide à visualiser le processus électrique. La figure 115 nous montre un circuit hydraulique fermé. Nous

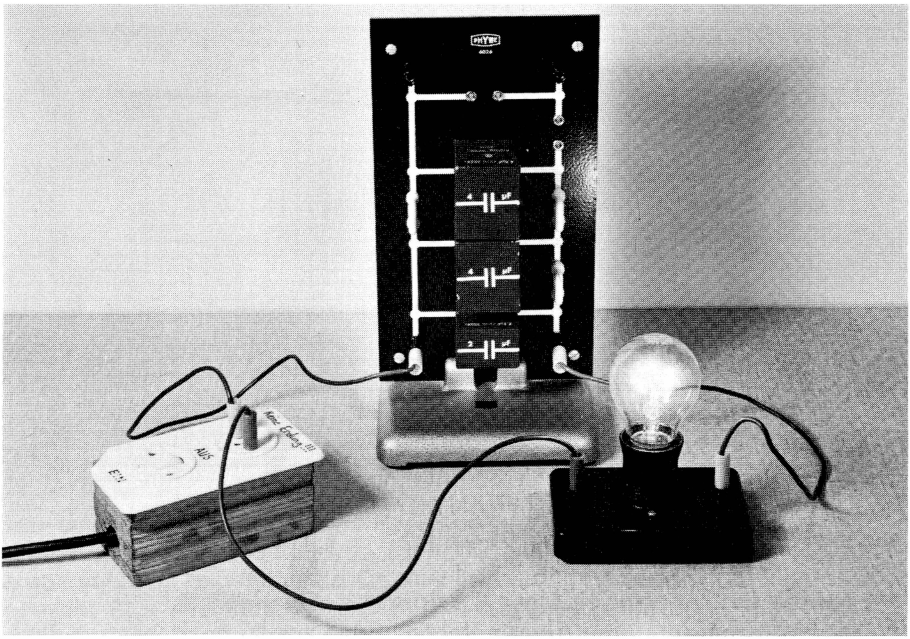


Figure 114

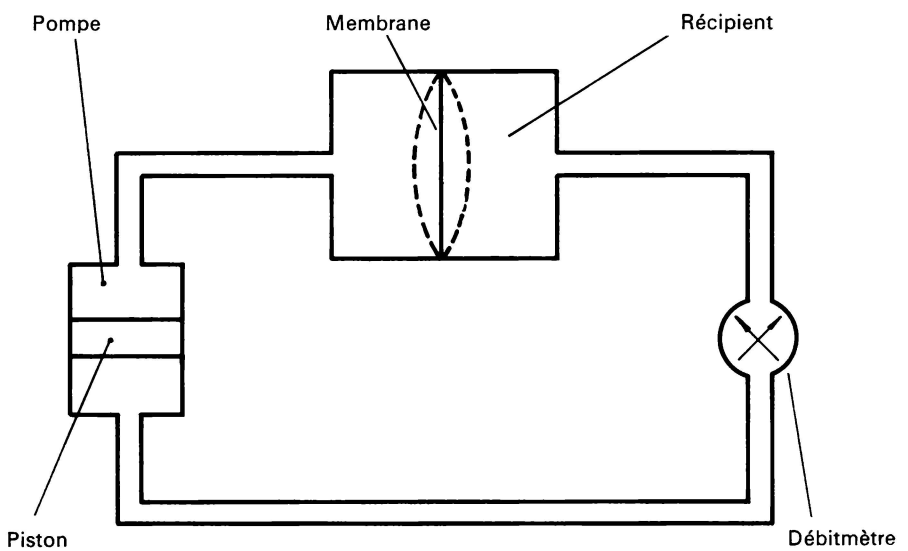


Figure 115

reconnaissons la pompe, qui est notre source de tension. Le courant est mesuré avec un débitmètre et le condensateur est de nouveau représenté par un récipient divisé en son milieu par une membrane en caoutchouc. Dans ce cas, la pompe devant représenter une source de tension alternative, pousse l'eau non pas dans un seul sens mais tantôt à droite tantôt à gauche. Supposons que le piston accomplisse ainsi 50 mouvements en une seconde dans chaque sens, cela correspondrait à une fréquence de 50Hz. Le débitmètre indique un « courant alternatif ». Dans un chapitre précédent, nous avons déterminé que le courant électrique était identique au nombre de porteurs de charge qui s'écoulent dans un conducteur par unité de temps. La quantité d'eau par unité de temps correspond par conséquent à l'intensité du courant. Maintenant, il est évident que plus le récipient et sa membrane seront grands et que plus la fréquence de la source de tension sera augmentée plus il s'écoulera d'eau de part et d'autre. Reporté sur le circuit électrique, cela signifie que le courant augmente avec l'accroissement de la fréquence et de la capacité.

Nous résumons :
Les condensateurs représentent une résistance pour le courant alternatif. *Plus la capacité et la fréquence sont élevées plus la résistance diminue.*
La résistance en courant alternatif du condensateur se nomme *réactance capacitive ou capacitance.*
Le symbole de la réactance de capacité est X_c.
L'unité de mesure de la réactance de capacité est l'ohm.
Le terme utilisé dans la pratique pour désigner la réactance de capacité est *capacitance.* (Pour les bobines on parle de *réactance d'induction.*)
La capacitance d'un condensateur se calcule selon la formule suivante :

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Le contrôle des unités prouve l'exactitude de la formule, lorsqu'on remplace le farad par As/V et le hertz par 1/s :

$$[X_c] = \frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \frac{As}{V}} = \frac{V}{A} = \Omega$$

La représentation vectorielle du courant et de la tension dans le condensateur.

Nous avons vu qu'un courant doit tout d'abord s'écouler avant qu'une tension n'apparaisse au condensateur. Lorsque la tension sur les plaques est maximale le courant de charge est égal à zéro. Cela montre que, dans le condensateur, *le courant est en avance de 90° sur la tension.* Ce *déphasage* entre le courant et la tension peut se visualiser par la représentation d'un diagramme vectoriel.

Pour chacune des valeurs du courant et de la tension, on emploie un vecteur. Ces vecteurs effectuent un tour par période dans le *sens inverse des aiguilles de montre* (sens antihoraire). Puisque le courant est en avance sur la tension, le vecteur du courant est perpendiculaire et celui de la tension est horizontal, comme l'indique la figure 116. La lettre grecque φ (phi) est utilisée pour désigner l'angle de déphasage.

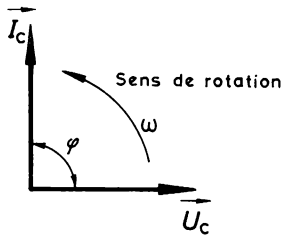


Figure 116

Diagramme de représentation linéaire du courant et de la tension

La figure 117 représente le courant et la tension en un diagramme linéaire. Ces courbes seraient visibles sur un oscilloscope cathodique en observant le courant et la tension. Cependant, ce mode de représentation n'est que peu utilisé car l'emploi des vecteurs offre plus de clarté. Avec les vecteurs, les calculs se simplifient en leur appliquant les lois de la trigonométrie alors que la représentation linéaire ne s'y prête que très mal.

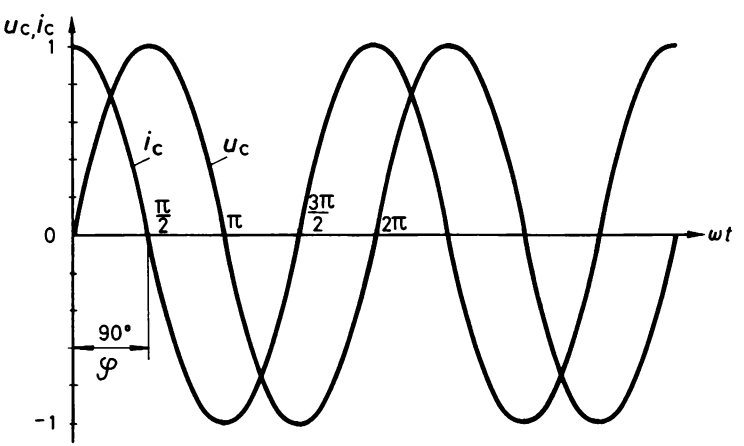


Figure 117

Réactance de capacité d'un condensateur en fonction de la fréquence

La capacitance d'un condensateur diminue de façon inversement proportionnelle à la fréquence. La figure 118 montre l'allure de la courbe de la capacitance en fonction de la fréquence.

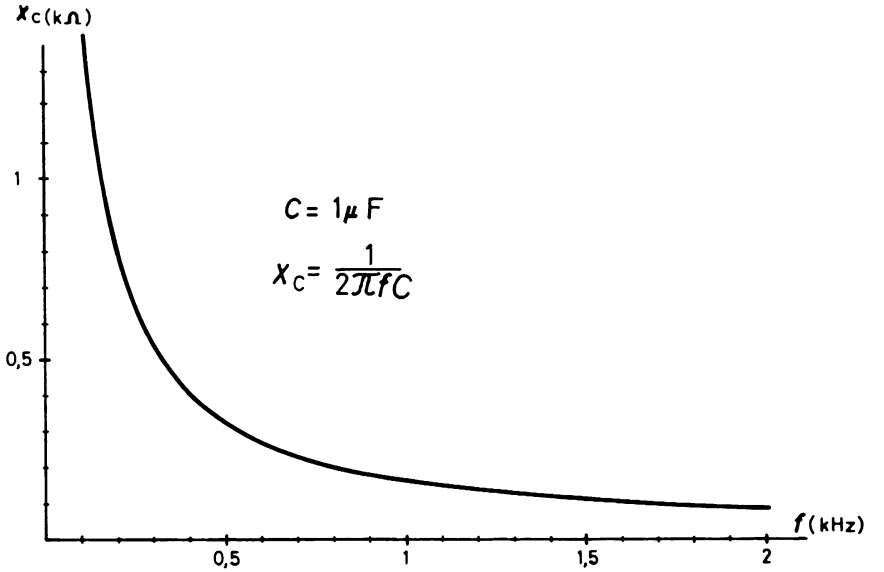


Figure 118

La puissance réactive

Si on multiplie le courant alternatif qui s'écoule à travers un condensateur par la tension aux bornes de ce condensateur on obtient ainsi la *puissance réactive.* Le nom de puissance réactive veut dire qu'ici il ne s'agit pas d'une puissance véritable (effective). *Le condensateur ne consomme aucune puissance.* Il accumule l'énergie électrique et la restitue ensuite au réseau. Ce phénomène se déroule deux fois par période du courant alternatif. La figure 119 montre la construction de la courbe de la puissance réactive. Entre le courant et la tension il y a un déphasage de 90°. En multipliant les valeurs momentanées du courant par celles de la tension nous obtenons les valeurs momentanées de la puissance. La courbe de puissance se présente avec une fréquence double de celle du courant ou de la tension. Puisque cette courbe se répartit en deux moitiés égales de part et d'autre de la ligne zéro (abcisse), la puissance prélevée pendant une période est nulle.
Les symboles utilisés dans les formules sont désignés par Q ou P_q. Pour ne pas confondre la puissance réactive avec la charge électrique Q nous conserverons le symbole P_q.

L'unité de la puissance réactive est le *var* (volt-ampère réactif).

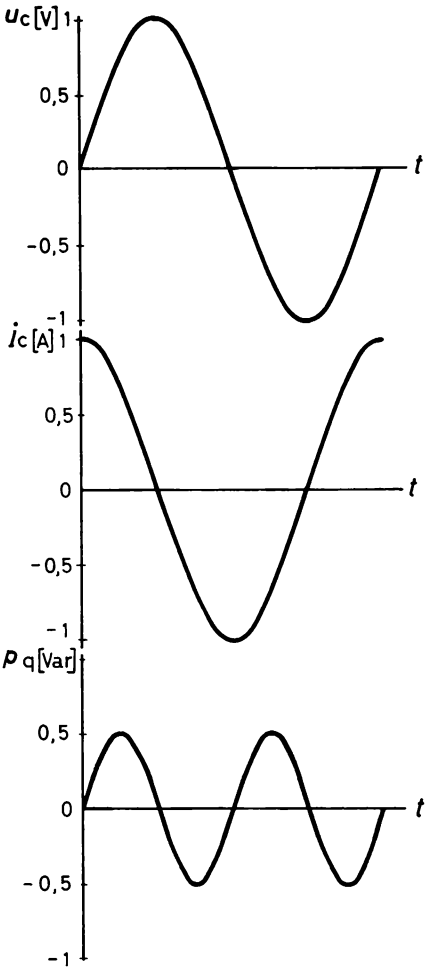


Figure 119

4. Exemples

a. Calcul de la capacité d'un simple condensateur à plaques

On doit calculer un condensateur simplement composé de plaques circulaires d'un diamètre de 12 cm distantes de 3 mm et dont le diélectrique est de l'air.

Marche à suivre:

– écrire la *formule de C*

$$C = \frac{\varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$C = \frac{0{,}8855 \cdot 1 \cdot 0{,}06^2 \cdot \pi}{0{,}003} \cdot 10^{-11}$$

$$[C] = \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F}$$

$$C = \mathbf{33{,}4\ pF}$$

b. Calcul de l'intensité du champ électrique

Le condensateur de l'exemple a été chargé avec $3 \cdot 10^{-8}$ As. Quelle est l'intensité du champ électrique?

Marche à suivre:

– écrire la formule de base

$$Q = C \cdot U$$

– extraire U de la formule

$$U = \frac{Q}{C}$$

– calculer U

$$U = \frac{3 \cdot 10^{-8}}{33{,}4 \cdot 10^{-12}} \frac{\text{As} \cdot \text{V}}{\text{As}}$$

$$U = 900\ \text{V}$$

– écrire la formule de E

$$E = \frac{U}{d}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$E = \frac{900}{3 \cdot 10^{-3}\,\text{m}} \frac{\text{V}}{}$$

$$E = \mathbf{300\,000\ V/m}$$

c. Calcul de la charge Q et de la capacité C

Selon le schéma de la figure 120, un condensateur est chargé avec un courant constant. La résistance variable R est réglée de telle façon que le prélèvement de courant reste constant. Après 5 s, U_c atteint 10 V.

Marche à suivre:

– écrire l'équation pour calculer Q

$$Q = I \cdot t$$

– introduire les valeurs et calculer

$$Q = 0{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 5\ \text{As}$$

$$Q = 0{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{As}$$

– écrire l'équation pour le calcul de C

$$C = \frac{Q}{U_c}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$C = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-3}}{10}\ ;\ [C] = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F}$$

$$C = \mathbf{50\ \mu F}$$

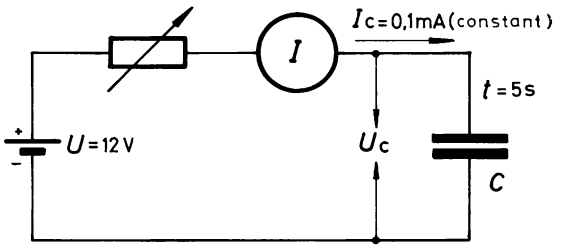


Figure 120

d. Calcul d'un circuit composé (association de condensateurs)
La capacité totale du circuit série-parallèle, selon la figure 121, est connue. Calculer la valeur du condensateur inconnu C_x.

Marche à suivre:
Première étape:
- calculer la valeur de C_s du circuit série composé de C_1 et de C_x
- établir la formule du calcul $C_s = C_{tot} - C_2$
- introduire les valeurs et calculer $C_s = 12 - 8 = 4\ \mu F$

Deuxième étape:
- établir l'équation du calcul de C_x

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_x}}$$ permuter selon:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_x}$$ permuter selon:

$$\frac{1}{C_x} = \frac{1}{C_s} - \frac{1}{C_1}$$ permuter selon:

$$C_x = \frac{C_1 \cdot C_s}{C_1 - C_s}$$

- introduire les valeurs et calculer

$$C_x = \frac{5 \cdot 4}{5 - 4}\ \frac{\mu F^2}{\mu F}$$

$$C_x = \mathbf{20\ \mu F}$$

Cet exercice peut se résoudre en une seule étape. Essayez-le!

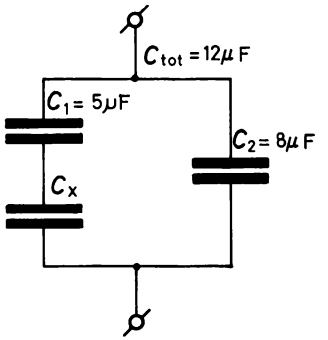


Figure 121

e. Calcul d'une constante de temps

Calculer la constante de temps du circuit *R-C* de la figure 122.

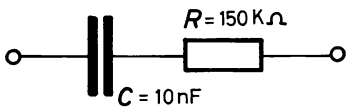


Figure 122

Marche à suivre:

– écrire la formule de base $\tau = C \cdot R$

– introduire les valeurs et calculer $\tau = 10 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}15 \cdot 10^{6}$

$$[\tau] = \frac{As \cdot V}{V \cdot A} = s$$

τ = **1,5 ms**

f. Calcul d'un condensateur dans un circuit alternatif

La capacité du condensateur de la figure 123 doit être calculée.

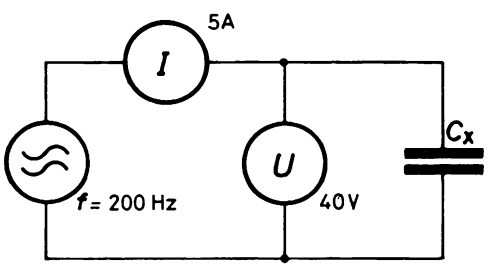


Figure 123

Marche à suivre:
Première étape:
– calcul de la réactance capacitive

– écrire son équation $X_c = \frac{U}{I}$

– introduire les valeurs et calculer $X_c = \frac{40\,\text{V}}{5\,\text{A}}$

$X_c = 8\,\Omega$

Deuxième étape:
– calcul de la valeur de la capacité

– écrire la formule de base $X_c = \frac{1}{\omega C}$; $[X_c] = \text{s} \cdot \frac{\text{V}}{\text{As}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$

– permuter selon C $C = \frac{1}{\omega X_c}$; $[C] = \frac{1}{\text{s}^{-1}\Omega} = \frac{\text{sA}}{\text{V}} = \text{F}$

– introduire les valeurs et calculer $C = \frac{1}{2\pi \cdot 0{,}2 \cdot 10^3 \cdot 8}$

$C = \mathbf{99{,}5\ \mu F}$

5. L'essentiel

Le condensateur se compose de deux plaques métalliques isolées l'une par rapport à l'autre. Le matériau isolant, entre les plaques, se nomme diélectrique. Le condensateur peut accumuler une charge électrique. Plus la capacité et la tension appliquées sont grandes, d'autant plus grande sera la charge accumulée. L'unité de mesure de la charge est le coulomb. Un coulomb correspond à un ampèreseconde. La charge est égale au courant multiplié par le temps.
La capacité d'un condensateur est déterminée par la surface des plaques, la distance entre elles et la nature du diélectrique. La capacité est d'autant plus grande que la surface des plaques l'est aussi et que la distance entre elles est petite. La capacité varie proportionnellement avec la constante diélectrique, elle se mesure en farads. Un farad correspond à un ampère-seconde par volt.
Nous connaissons les condensateurs à plaques pour les circuits haute fréquence, les condensateurs variables pour les circuits haute fréquence, les condensateurs trimmers pour l'alignement de circuits, les condensateurs enroulés utilisés comme capacités de découplage et dans les circuits basse fréquence, les condensateurs céramique pour les circuits haute fréquence, les condensateurs au papier métallisé qui se « guérissent d'eux-mêmes » utilisés dans les circuits basse fréquence et de filtrage. Enfin les condensateurs électrolytiques pour la basse fréquence, le filtrage et les circuits à transistors. Les pertes dans les condensateurs se manifestent comme des pertes série ou parallèle. L'unité de mesure de ces pertes, qui nous est connue, se nomme facteur de pertes tangente δ; celle-ci est dépendante de la fréquence.

Lorsque des condensateurs sont utilisés dans des circuits accordés (déterminant une fréquence), le coefficient de température doit être pris en considération. En associant judicieusement des condensateurs dont le coefficient de température est positif avec d'autres dont le coefficient de température est négatif, la capacité résultante est pratiquement indépendante des variations de température.
La capacité résultante de condensateurs en parallèle est égale à la somme des capacités partielles.
L'inverse de la capacité résultante de condensateurs en série est égale à la somme des inverses des capacités partielles.
Lorsqu'un condensateur est chargé à travers une résistance on désigne par constante de temps la durée nécessaire pour que le condensateur atteigne le 63% de sa tension de charge. La constante de temps correspond au produit de la résistance de charge par la capacité.
Un condensateur ne laisse pas passer le courant continu mais il se comporte, en revanche, comme une résistance dans un circuit à courant alternatif. La valeur de cette résistance, en courant alternatif, est inversement proportionnelle à la fréquence et à la capacité. Dans un condensateur, le courant avance de 90° sur la tension.
Le produit de la tension au condensateur par le courant qui le traverse se nomme puissance réactive. L'unité de mesure de la puissance réactive est le var.

6. Exercices de répétition (solutions page 448)

a) Donnez une définition de la charge électrique Q.
b) Quels sont les facteurs qui déterminent la capacité d'un condensateur ?
c) Un condensateur de 75 pF, dont le diélectrique est de l'air, se compose de deux plaques distantes de 0,1 mm. Quelle est la surface des plaques ?
d) Qu'entend-t-on par le terme de « constante diélectrique du vide » ?
e) Une tension de 120 V règne aux bornes d'un condensateur chargé. Quelle est la valeur de sa capacité si la charge accumulée est de $0{,}24 \cdot 10^{-3}$ As ?
f) Un condensateur de 100 pF, dont la surface des plaques est de 100 cm et le diélectrique de l'air, a accumulé une charge de $4 \cdot 10^{-9}$ As. Quelle est la valeur de l'intensité du champ entre les plaques ?
g) Définissez le terme de « constante de temps » pour un circuit RC.
h) La constante de temps d'un circuit RC est de 50 ms, la résistance de charge est de 330 kΩ. Quelle est la capacité du condensateur ?
i) Un condensateur de 5 μF est relié en série avec un autre condensateur de capacité inconnue. Parallèlement à ce circuit série un condensateur de 10μF est branché. La capacité résultante de cette association est de 12 μF. Calculez la valeur de la capacité inconnue.
k) Un condensateur variable a été chargé avec 100 V. Puis le rotor est tourné jusqu'à ce que le condensateur ne présente plus que la moitié de sa capacité. Quelle tension règne maintenant aux bornes du condensateur ?
l) Vous désirez mesurer la capacité d'un condensateur inconnu. A cet effet, vous branchez celui-ci à travers un milliampèremètre à courant alternatif sur une tension de 220 V/ 50 Hz. Vous mesurez un courant de 0,207 A. Quelle est la valeur du condensateur ?
m) Quel avantage présente le condensateur à papier métallisé par rapport aux condensateurs ordinaires enroulés ?
n) A quoi faut-il prendre garde lors de l'utilisation d'un condensateur électrolytique ?

III. Bobines

1. Introduction

Nous avons appris que le condensateur est un composant important de l'électronique. L'importance de la bobine (ou solénoïde) ne le cède en rien à celle du condensateur. Les deux composants se complètent dans de nombreux circuits de la technique des télécommunications. La bobine est le complément du condensateur, son comportement dans les circuits à courant continu et alternatif est la réciproque de celui du condensateur. Dans les appareils on rencontre des bobines de formes, de dimensions et de genre de construction très divers.
Dans les circuits à courant continu, les bobines sont utilisées comme composants des cellules de filtrage. En haute fréquence on les rencontre souvent comme éléments des circuits oscillants et des filtres de bande. Dans les transformateurs, les bobines sont indispensables à la transformation des tensions alternatives.

2. Que savez-vous au sujet des bobines ?
(solutions page 451)

a) De quoi une bobine est-elle composée ?
b) Quelle est l'unité de mesure de l'inductance ?
c) Quelle est l'action d'une bobine dans un circuit à courant continu ?
d) Comment une bobine se comporte-t-elle dans un circuit à courant alternatif ?
e) Quelles sortes de bobines vous sont-elles connues ?
f) Quelle est l'action d'un noyau de fer dans une bobine ?
g) Qu'est-ce qu'un champ magnétique ?

3. Bobines

a. Définition

La bobine possède la propriété d'accumuler l'énergie électrique sous la forme d'un champ magnétique. Dans un circuit continu la bobine, si l'on ne tient pas compte de l'instant de l'enclenchement et du déclenchement, n'agit que comme une résistance ohmique. Cette résistance correspond à celle du bobinage. Dans un circuit à courant alternatif elle se comporte comme une réactance dont la valeur dépend de la grandeur de l'inductance et de la fréquence.

b. Principe

La bobine se compose d'un certain nombre de spires qui ne sont soutenues qu'à leurs extrémités ou supportées par un corps de bobine. Nous opérons une distinction entre les bobines avec noyau de fer et celles qui n'en possèdent pas. La grandeur, le nombre de spires, le genre de noyau et la forme de la construction des bobines dépendent du but poursuivi et déterminent leurs caractéristiques.

c. La self-induction

Nous savons que, dans un conducteur qui se meut dans un champ magnétique, il se développe une tension induite. A la place du conducteur le champ magnétique peut aussi être mis en mouvement et l'effet sera le même. L'expérience, selon la figure 124, démontre l'effet de l'induction.

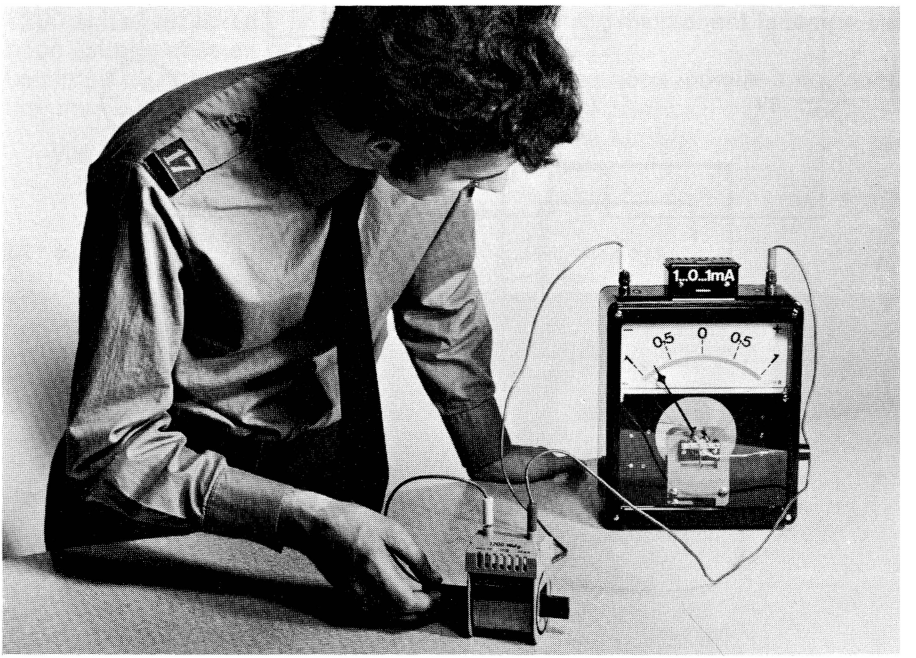


Figure 124

Une bobine de 1200 spires est reliée à un milliampèremètre. L'aiguille de l'instrument a son zéro au milieu de l'échelle. Un barreau aimanté est introduit lentement dans la bobine, avec une vitesse constante et retiré de même. L'instrument dévie dans un certain sens lors de l'introduction du barreau et en sens inverse lors de son retrait.
L'essai est répété mais en déplaçant plus rapidement le barreau aimanté. Les déviations de l'aiguille de l'instrument sont plus importantes.
La bobine est remplacée par une autre dont le nombre de spires est de 600. L'expérience est répétée avec les deux vitesses. Les déviations observées sont plus petites que pour la bobine de 1200 spires.
L'expérience nous a confirmé ce que nous savions déjà. *La tension induite est d'autant plus grande que le champ magnétique se déplace rapidement. La tension croît avec l'augmentation du nombre de spires.*

Il est indifférent que la variation du champ magnétique soit obtenue au moyen d'un aimant permanent ou avec un électroaimant. L'expérience, selon les figures 125 et 126, montre la production d'une tension de self-induction à l'aide d'un électroaimant.

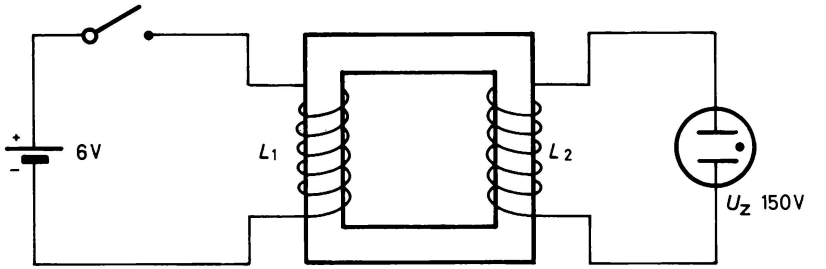


Figure 125

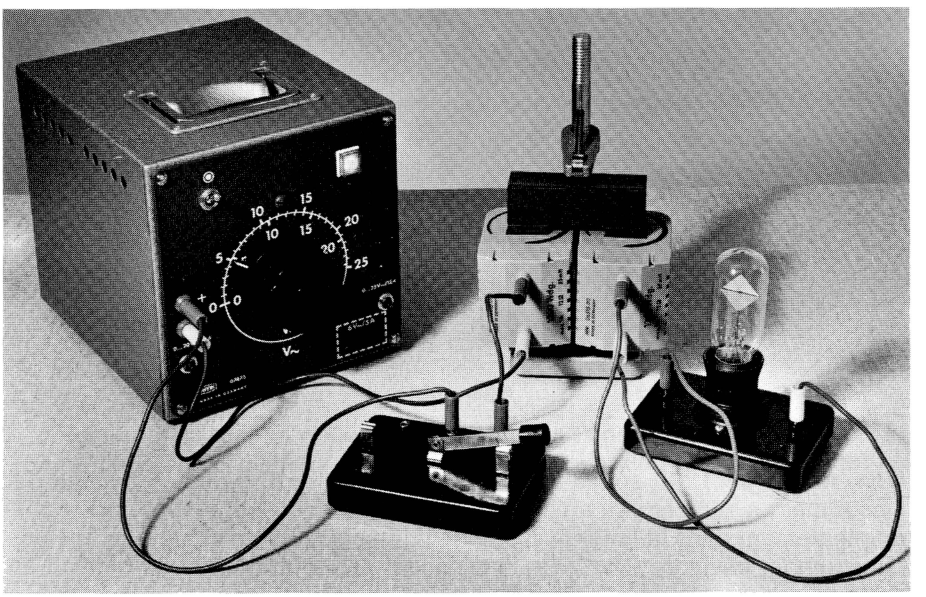


Figure 126

Deux bobines de 1200 spires sont montées sur un noyau de fer. La bobine L_1 est reliée, à travers un interrupteur, à une source de tension de quelques volts. Une lampe à effluves (lampe au néon), dont la tension d'allumage est de 150 V, est reliée à la bobine L_2. Dans le noyau de fer un champ magnétique est actif. La cause de ce champ magnétique est le courant qui passe dans la bobine L_1.

L'interrupteur est ouvert, la lampe au néon indique une tension induite en s'allumant un bref instant. L'explication de ce phénomène est simple. Lorsque le circuit de la bobine L_1 est interrompu, le champ magnétique tombe subitement à la valeur zéro. Une variation rapide du champ a lieu. Cette variation de champ induit une tension dans la bobine L_2.
Dans l'essai de la figure 127 le montage est simplifié. Une seule bobine de 1200 spires est reliée à la source de tension. Mais, maintenant la lampe au néon est branchée en parallèle avec cette bobine.
Le circuit du courant est interrompu et la lampe au néon indique à nouveau une impulsion de tension induite.

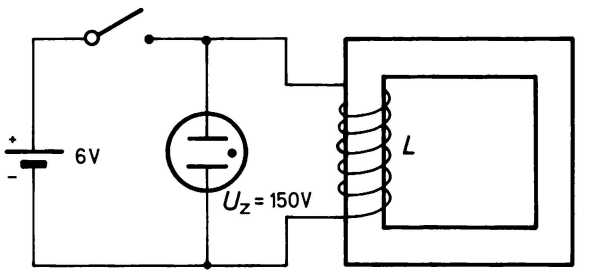


Figure 127

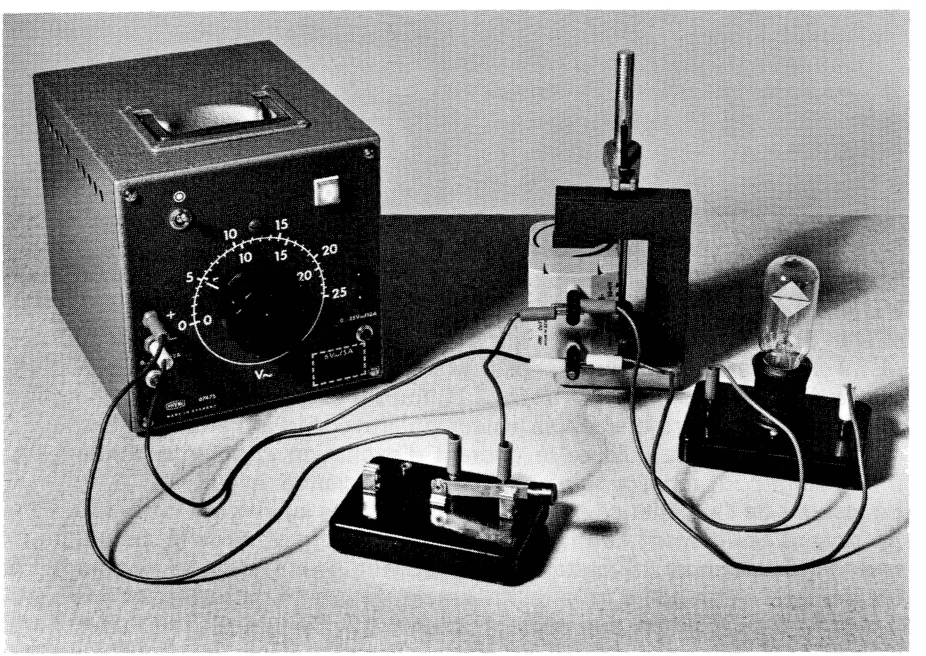


Figure 128

Le champ magnétique, interrompu par la coupure du courant, induit aussi une tension dans la bobine d'excitation. Cette tension s'appelle : *tension de self-induction.* Le processus décrit se nomme : *self-induction.*
Le sens du courant de self-induction, qui s'écoule grâce à la tension de self-induction, est important pour le comportement en travail de la bobine. La figure 129 donne le schéma de l'expérience dont la figure 130 indique le montage. Cet essai montre le sens du courant de self-induction.

Figure 129

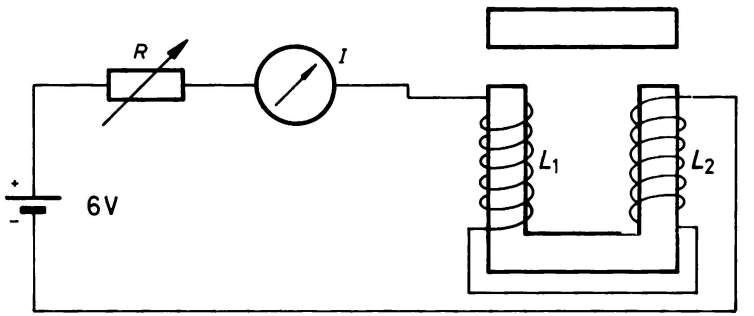
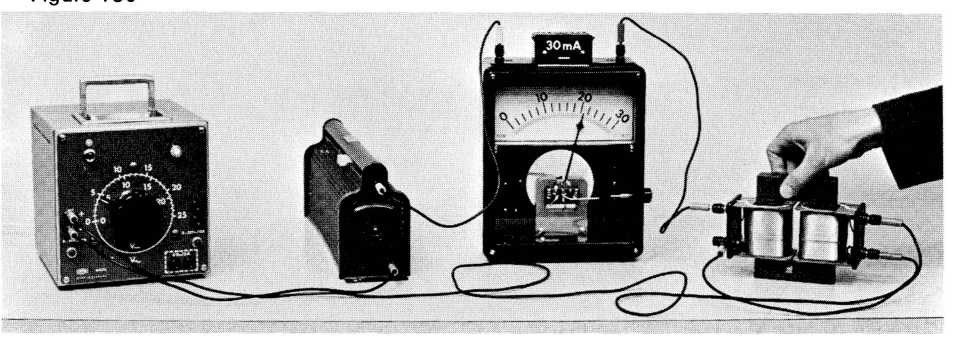


Figure 130



L'armature, sur la bobine, est enlevée. Le courant de la bobine est réglé, au moyen de la résistance variable, de façon à ce que l'aiguille du milliampèremètre arrive au milieu de l'échelle. Maintenant, l'armature est rapidement posée sur la culasse (ou noyau). Le courant d'excitation diminue brusquement pour reprendre ensuite sa valeur primitive. Si l'armature est brusquement arrachée de la culasse le courant d'excitation augmente pendant un bref instant pour redescendre ensuite à son ancienne valeur.
Le résultat de l'expérience permet les conclusions suivantes :
En posant rapidement l'armature, le flux magnétique, dans le circuit, augmente brusquement. Simultanément, le courant d'excitation diminue. En réalité, il ne s'agit pas d'un affaiblissement du courant d'excitation mais, au contraire, de l'addition des courants d'excitation et de self-induction. *Cela signifie que le courant de self-induction s'écoule en sens inverse du courant d'excitation lorsque le flux magnétique est augmenté.*

En arrachant brusquement l'armature le flux magnétique est également affaibli de façon subite. L'augmentation du courant d'excitation prouve que *le courant de self-induction, lors de l'affaiblissement du champ magnétique, s'écoule dans le même sens que le courant d'excitation.*

Le comportement du courant de self-induction dans une bobine peut être visualisé au moyen d'un modèle mécanique. Sur une ligne de chemin de fer horizontale et rectiligne un wagon de marchandises roule avec une vitesse constante. Lorsque le frottement des roues et la résistance de l'air sont tenus pour négligeables le wagon roule indéfiniment avec une vitesse constante. Si sa vitesse doit être augmentée il faut l'accélérer par une force extérieure agissant dans le sens de sa marche. A cette force, l'inertie du wagon oppose une forte résistance. Si le wagon qui roule doit être freiné il faut lui opposer une force de freinage qui va à l'encontre de son sens de marche pour vaincre l'inertie du wagon. L'inertie du wagon de marchandises peut se comparer au comportement de la bobine. Si le champ magnétique est renforcé, ce qui correspond à l'accélération du wagon, il est nécessaire de dépenser une force supplémentaire. Le courant de self-induction s'oppose à un renforcement du champ, il doit d'abord être surmonté. Cet effet correspond à l'inertie du wagon, qui doit être surmontée en premier lieu, jusqu'à ce qu'il roule avec une plus grande vitesse. Lorsque le champ est diminué, la self-induction s'efforce de maintenir le flux constant comme l'inertie du wagon essaye de maintenir son mouvement.

Le résultat de l'expérience peut se résumer ainsi :

Le courant de self-induction agit en sens contraire de la cause qui le produit, il a tendance à maintenir l'état existant.

d. Le coefficient de self-induction

La tension induite dans une bobine dépend de trois facteurs. Ce sont : la grandeur de la variation de courant, la vitesse avec laquelle cette variation s'effectue et le coefficient de self-induction de la bobine. Ce coefficient de self-induction, souvent nommé inductance, est comparable avec la capacité du condensateur. L'inductance d'une bobine détermine son comportement électrique. La relation entre les trois facteurs peut facilement se représenter par une équation simple.

$$-U\mathrm{i} = \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot L$$

$U\mathrm{i}$ = tension induite. Le signe indique que la tension est dirigée en sens contraire de la tension d'excitation
ΔI = variation de courant
Δt = variation de temps
L = inductance de la bobine

L'équation montre que la tension induite est d'autant plus grande que la variation de courant est forte, que le temps de cette variation de courant est bref et que l'inductance de la bobine est grande. L'unité de mesure de l'inductance, dans le système Giorgi, est donnée par l'équation suivante :

$$-U\text{i} = \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot L \qquad [U\text{i}] = \text{V} = \frac{\text{A}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

Dans le système Giorgi, à la place de $\frac{\text{Vs}}{\text{A}}$ l'henry est utilisé. 1 henry = 1 Vs/A.

Une bobine a donc une inductance de 1 henry ou un voltseconde par ampère, lorsque pour une variation de courant uniforme de 1 ampère pendant une seconde, une tension de 1 volt est induite.
Cette grandeur est tout à fait courante dans la pratique. Les bobines des cellules de filtrage et des circuits basse fréquence présentent souvent des inductances de plusieurs henrys. Les sous-multiples de cette unité, énumérés ci-dessous, sont utilisés :
1 mH = $1 \cdot 10^{-3}$ H (millihenry)
1 μH = $1 \cdot 10^{-6}$ H (microhenry)
Des inductances de l'ordre du millihenry sont employées dans la technique haute fréquence comme bobines de self, de choc, de blocage ou comme éléments des circuits oscillants pour les basses fréquences. Les inductances de l'ordre du microhenry sont utilisées dans la technique des hautes fréquences comme éléments des circuits oscillants pour des fréquences plus élevées jusque dans la gamme des VHF.

e. Les facteurs qui déterminent l'inductance

L'inductance d'une bobine dépend des facteurs suivants :
- du nombre de spires N
- de la longueur de la bobine l (en m)
- de la surface du bobinage A (m^2)
- du matériau du noyau (perméabilité relative μ)

Pour une longue bobine cylindrique à une couche la formule de dimension suivante est valable :

$$L = \frac{\mu_o \cdot r^2 \cdot \pi \cdot N^2}{l} \quad \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

r = rayon de la bobine

μ_o = perméabilité du vide = $\frac{4\pi}{10 \cdot 10^6} \quad \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

Pour des bobines plus courtes il faut tenir compte des facteurs de correction. La formule suivante permet le calcul de bobines à noyau de fer :

$$L = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A}{l} \quad \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \quad (l = \text{longueur du circuit dans le fer})$$

Vérification des unités : $[L] = \frac{Vs}{Am} \cdot \frac{m^2}{m} = \frac{Vs}{A}$

f. Formes de fabrication

Bobine cylindrique

La bobine cylindrique peut n'être soutenue qu'à ses extrémités ou enroulée sur un corps de bobine. La figure 131 montre un type de bobine souvent utilisé comme élément des circuits oscillants dans les étages de puissance des émetteurs. Ce genre de bobine se voit aussi dans les appareils de syntonisation d'antenne des émetteurs. La figure 132 montre les deux symboles les plus utilisés dans les schémas.

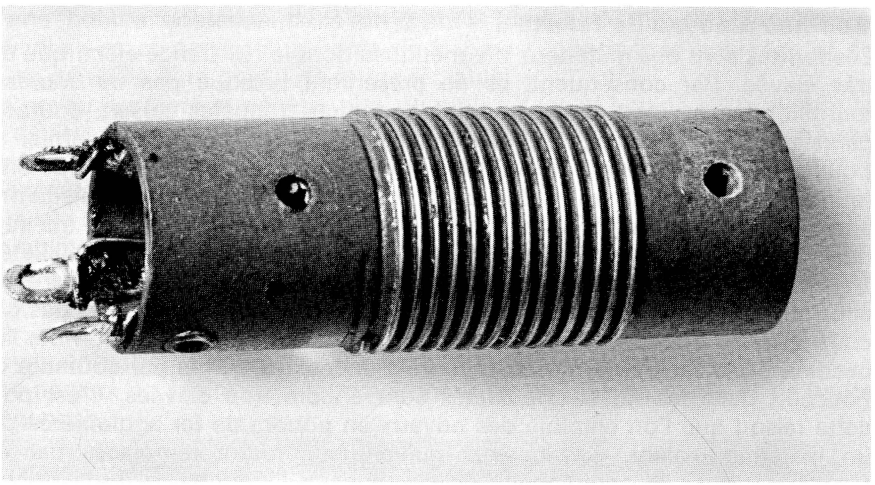
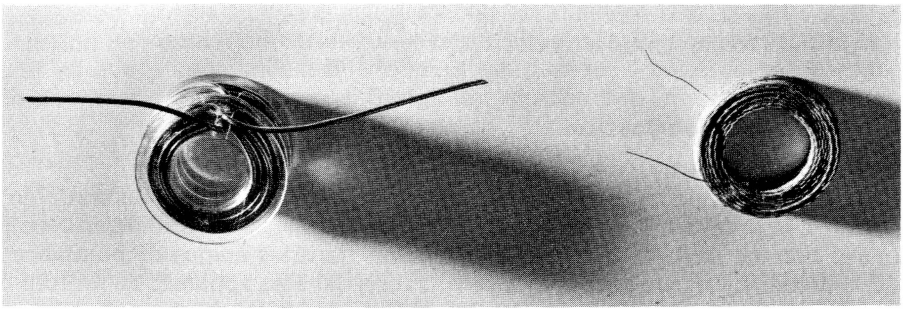


Figure 131

Figure 132

Bobines « sur l'air » (sans noyau)

Les bobines « sur l'air » sont des inductances sans noyau. La bobine dénommée « bobine cylindrique » est aussi une « bobine sur l'air ». Ces types de bobines se fabriquent dans des grandeurs et des formes diverses. Elles sont principalement utilisées comme bobines de self (ou de blocage, d'arrêt, de choc, etc.) et comme éléments des circuits oscillants. La figure 133 montre quelques bobines de ce type parmi les plus utilisées.



Avec corps de bobine (support) Sans support

Figure 133

Bobines à noyau de ferrite

Les ferrites sont des matériaux magnétiques dont la résistance électrique est très élevée. Par conséquent, ils ne présentent presque pas de courants tourbillonnaires. Ces courants tourbillonnaires (appelés aussi : courants parasites) se produisent dans chaque noyau de fer lorsque ce dernier se trouve dans une bobine parcourue par un courant alternatif. Les courants tourbillonnaires ou courants de Foucault provoquent des pertes puisqu'une énergie est nécessaire pour les produire. Les courants de Foucault, qui sont nuisibles, peuvent être fortement diminués par l'emploi de noyaux feuilletés. Ce sont des noyaux composés d'un grand nombre de tôles de fer isolées entre elles et de faible épaisseur (0,3-1 mm). La plupart des inductances des circuits basse fréquence ont des noyaux feuilletés (ou lamellés). Pour les besoins de la technique des hautes fréquences, les pertes par courants de Foucault dans les noyaux feuilletés sont encore trop élevées. C'est pour cette raison que l'on emploie des noyaux en poudre de fer agglomérée par un matériau isolant. Ces noyaux pulvérulents furent remplacés par les ferrites. Grâce à la perméabilité de ces noyaux l'inductance de la bobjne augmente. Il s'ensuit que, pour une inductance déterminée, moins de spires sont nécessaires. Nous verrons plus tard que la résistance du bobinage apparaît comme une perte pour la bobine. La résistance du bobinage est d'autant plus faible que le nombre de spires est minime.

Les bobines avec noyau de ferrite sont fabriquées pour réaliser des inductances composées d'une bobine et d'un noyau en forme de bâtonnet ou

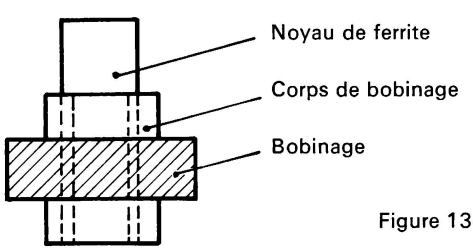
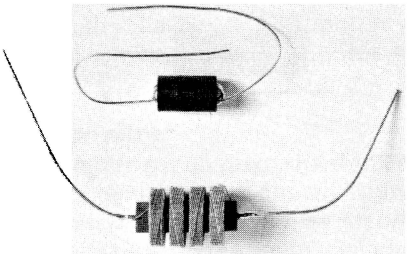
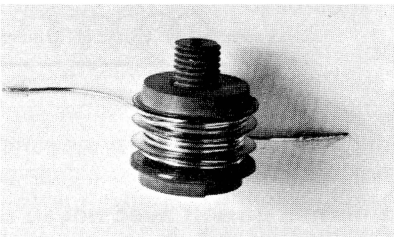


Figure 134



Inductance fixe



Inductance variable

Figure 135

d'une bobine contenue dans un « pot » formant le noyau. Une bobine « ferrite » se compose d'un corps de bobine supportant le bobinage et en règle générale d'un noyau de ferrite réglable.
Le noyau est fileté et pénètre plus ou moins dans la bobine en le vissant et le dévissant. Ainsi l'inductance de la bobine peut être variée dans certaines limites. Les figures 134 et 135 en montrent le principe et quelques formes d'exécution.
Il existe des bobines où le noyau de ferrite est en forme de « pot » et entoure complètement la bobine. L'effet du noyau est bien plus grand que pour les bobines à bâtonnet droit parce que le circuit magnétique est fermé. Les noyaux en pot avec entrefer réglable permettent le réglage de l'inductance par la variation de l'entrefer. La figure 136 montre quelques bobines avec noyau en pot et la figure 137 les symboles correspondants.
Les noyaux en ferrite sont fabriqués pour les circuits de basse et de haute fréquence.

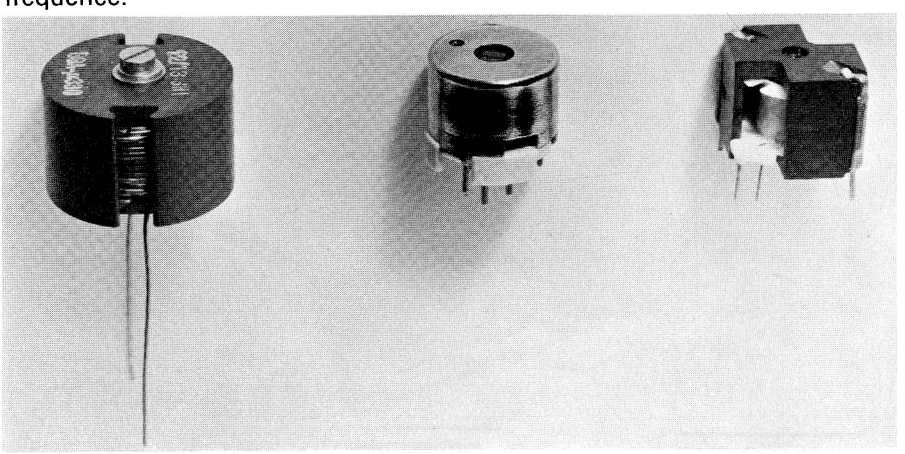


Figure 136

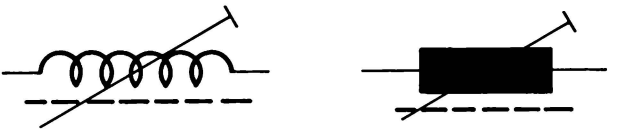


Figure 137

Bobines de self avec noyau de fer

Les bobines de self avec noyau de fer se composent d'un corps de bobine supportant le bobinage et d'un noyau de fer feuilleté. Elles sont principalement utilisées dans les circuits basse fréquence et dans les cellules de filtrage. Un entrefer est souvent aménagé dans le noyau de manière à éviter une trop forte préaimantation de celui-ci. Nous savons que la perméabilité relative d'un noyau de fer n'a pas une grandeur constante. Sa valeur dépend fortement de la magnétisation. La perméabilité relative diminue lorsque l'intensité du champ magnétique augmente. Cet effet aurait pour conséquence que l'inductance de la bobine serait dépendante du courant d'excitation. L'entrefer représente une grande résistance magnétique et de ce fait il détermine grandement le flux magnétique. Ainsi, la variation de flux est limitée. Il résulte de cette mesure que l'inductance ne change que très peu lors de variations de courant.

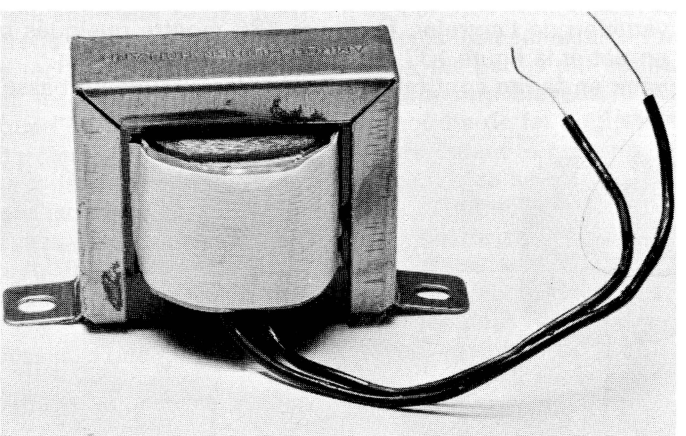


Figure 138

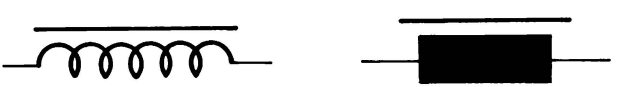


Figure 139

Plus l'entrefer est grand, d'autant plus le flux magnétique et l'inductance seront petits. La figure 138 montre une bobine de self avec noyau de fer. Les deux symboles les plus utilisés sont représentés par la figure 139.

Le variomètre

Un variomètre est un dispositif dont l'inductance est variable. On en distingue diverses exécutions. La construction la plus simple consiste en une *bobine et un curseur se déplaçant de façon continue* sur celle-ci. Le plus souvent la bobine est supportée par un cylindre tournant sur son axe ; le fil de la bobine est étamé. Le curseur sert de contact. Il est guidé par la rotation de la bobine et se déplace tout au long de celle-ci. Il est ainsi possible d'effectuer un contact pour un nombre de spires compris entre zéro et la totalité des spires du variomètre ce qui permet de varier l'inductance entre zéro et la valeur maximale de façon continue. Ce genre de variomètre est utilisé le plus souvent dans l'étage final des émetteurs comme élément du circuit oscillant et dans les appareils de syntonisation d'antenne comme inductance réglable. La figure 140 montre un variomètre avec curseur de contact et la figure 141 les symboles les plus utilisés représentant des variomètres à inductance variable.

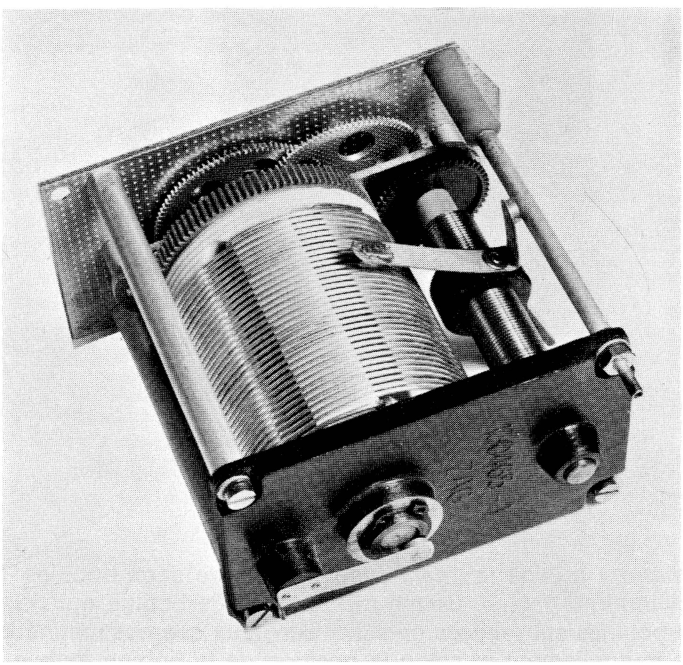


Figure 140

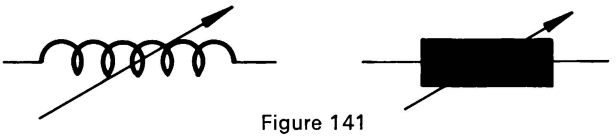


Figure 141

Le *variomètre à noyau de ferrite* relève d'un autre principe. Un noyau de ferrite plonge dans une bobine cylindrique et ainsi l'inductance varie dans une certaine gamme. Ce genre de variomètre est souvent utilisé dans les émetteurs et les récepteurs comme élément variable d'un circuit oscillant. La figure 142 montre deux de ces variomètres montés dans le circuit d'un petit émetteur tandis que la figure 143 indique les deux symboles les plus utilisés pour les variomètres à noyau de ferrite.

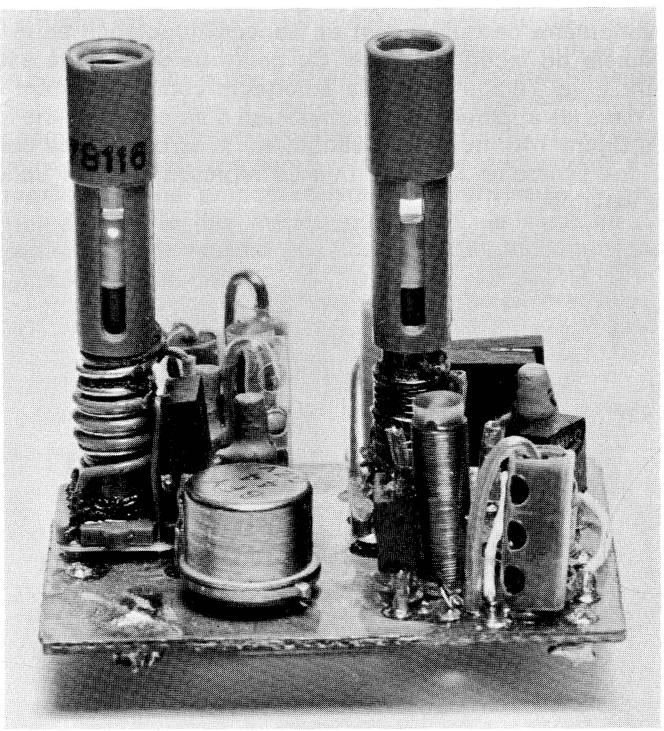


Figure 142

Le *variomètre à bobine tournante* se compose de deux bobines. Dans une bobine cylindrique fixe se trouve une plus petite bobine qui peut tourner. Les deux bobines sont reliées en série. Les deux champs magnétiques s'influencent mutuellement et selon la position de la bobine mobile le champ résultant est augmenté ou diminué.

De cette façon l'inductance du montage varie également. Le variomètre à bobine tournante permet de couvrir une gamme relativement grande de la valeur de l'inductance. Ses possibilités d'emploi sont multiples. Il est utilisé partout là où une gamme de fréquences, aussi grande que possible, doit être variée de façon continue. La figure 144 nous montre la construction d'un variomètre à bobine tournante. Le symbole de ce type de variomètre est le même que celui avec curseur (figure 141).

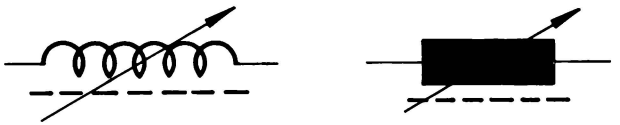


Figure 143

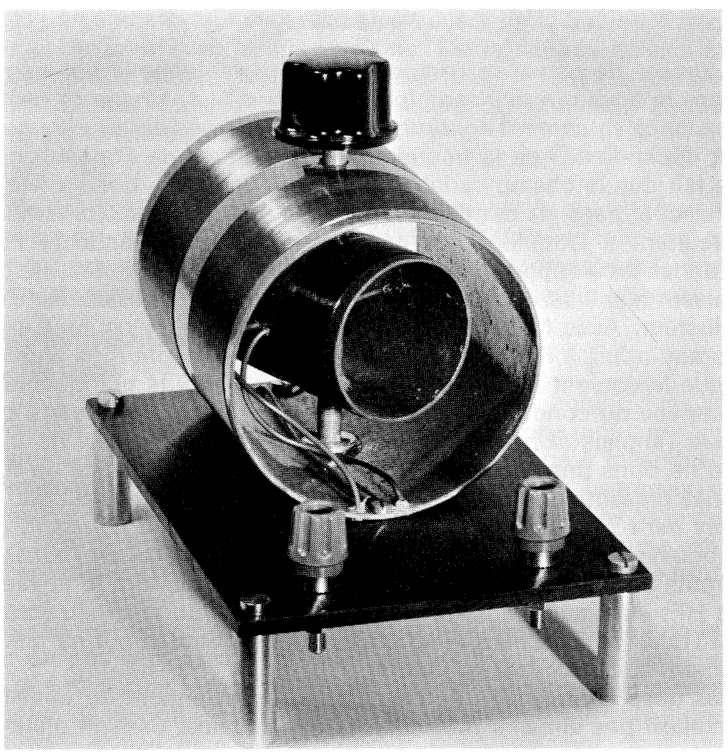


Figure 144

g. Caractéristiques

La bobine est déterminée par la *valeur de son inductance, son facteur de qualité, sa capacité propre et ses coefficients de température.*

Le facteur de qualité de la bobine Q_L

Une inductance pure, sans résistances de pertes ne peut pas se fabriquer. Les résistances de pertes se manifestent, comme pour le condensateur, sous la forme de résistances en série ou en parallèle à l'inductance. La figure 145 montre les deux schémas équivalents.

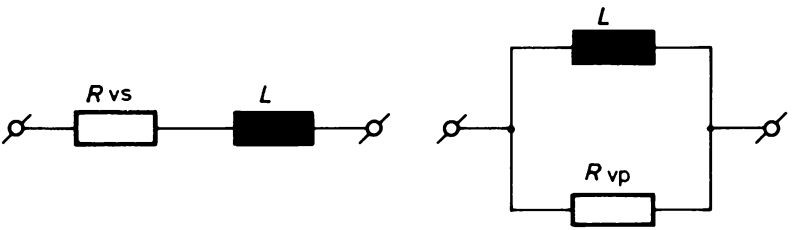


Figure 145

Les résistances de pertes se composent des pertes dans le bobinage et de celles dans le noyau. A leur tour, les *pertes dans le bobinage* se composent de la *résistance en courant continu* de la bobine et des *pertes par courant de Foucault* dépendantes de la fréquence. Les courants de Foucault ont pour cause le fait que le champ variable, passant à travers le conducteur, induit dans celui-ci et dans les conducteurs voisins des courants alternatifs qui se court-circuitent à l'intérieur des conducteurs. Ces courants de Foucault (tourbillonnaires) s'opposent aux courants alternatifs induits, les affaiblissent et produisent le même effet qu'une augmentation de la résistance ohmique du conducteur. Avec l'augmentation de la fréquence, le courant inducteur et le courant induit, à l'intérieur du conducteur, augmentent de plus en plus si bien que le courant haute fréquence utile ne s'écoule pratiquement plus qu'à la surface du conducteur. L'influence de cet effet de « peau » ou effet pelliculaire (anglais *skin effect*) peut être réduit par l'emploi de fil divisé composé de brins fins, isolés entre eux et torsadés, à la place de fil plein. Le fil divisé présente une plus grande surface pour la même section.
Les *pertes dans le noyau* se composent des *courants de Foucault*, comme dans le bobinage, ainsi que des *pertes dues à l'inversion de l'aimantation.* Les courants de Foucault sont fortement réduits en divisant le noyau (tôles fines, fer HF) ainsi qu'en abaissant la conductibilité du matériau composant le noyau (tôles de fer alliées avec du silicium ou ferrites qui ne présentent pratiquement aucune conductibilité).
Les pertes dues à l'inversion de l'aimantation proviennent du travail causé par la rotation des aimants moléculaires élémentaires dans le matériau du noyau. Elles sont maintenues aussi basses que possible par l'emploi de matériaux « doux ».

Des pertes supplémentaires par courants de Foucault peuvent encore se produire dans les boîtiers de blindage, lorsque les bobines présentent une forte dispersion du champ (bobines avec des noyaux droits).
Les pertes dans les bobines s'évaluent par des mesures techniques. La qualité de la bobine Q_L est, comme indiqué précédemment, le rapport de la réactance à la résistance de perte série ou de la résistance parallèle à la réactance :

$$Q_L = \frac{X_L}{R_{vs}} = \frac{R_{vp}}{X_L}$$

X_L = réactance de la bobine
R_{vs} = résistance de perte série
R_{vp} = résistance de perte parallèle

Cette qualité des bobines est importante dans les circuits à courant alternatif. La qualité des bobines ordinaires pour circuits HF se situe dans de petites valeurs dont l'ordre de grandeur est 40 pour de très hautes fréquences et atteint 500 pour les fréquences dans la gamme des longues ondes.

La capacité propre

La capacité propre ou capacité de l'enroulement de la bobine se manifeste comme si un condensateur était relié en parallèle sur la bobine. Chaque spire forme une capacité avec la spire voisine. De la somme de ces capacités résulte la capacité propre. Dans les circuits haute fréquence elle cause une gêne remarquable. Une disposition spéciale du bobinage permet de la maintenir à une faible valeur.

Le coefficient de température

Le coefficient de température des inductances est faible. Il se situe, selon le matériau du noyau, entre 2 ... $16 \cdot 10^{-6}$. Dans les circuits oscillants déterminant une fréquence il faut prendre garde à compenser l'influence du coefficient de température par le choix d'un condensateur adéquat.

h. Le comportement en travail des bobines

La bobine dans le circuit à courant continu

L'expérience suivante montre le comportement d'une bobine dans un circuit à courant continu. Dans le schéma de la figure 146, une inductance est reliée à une source de tension continue à travers une lampe à incandescence et un interrupteur. La lampe indique le courant de la bobine. La tension continue est réglée de façon à ce que la lampe, qui se trouve dans le circuit de la bobine éclaire brillamment. La luminosité de la deuxième lampe est ajustée, avec la résistance variable, pour qu'elle soit égale à celle qui se trouve dans le circuit de la bobine.
L'interrupteur est ouvert puis refermé. La lampe dans le circuit de la bobine s'allume un peu plus tard que celle dans le circuit de la résistance. Cela signifie que le courant dans la bobine retarde par rapport à la tension. Ce phénomène s'explique facilement à l'aide du courant de self-induction. A l'instant de l'enclenchement, le courant tend à passer dans un temps extrêmement court de la valeur zéro à la valeur maximale.

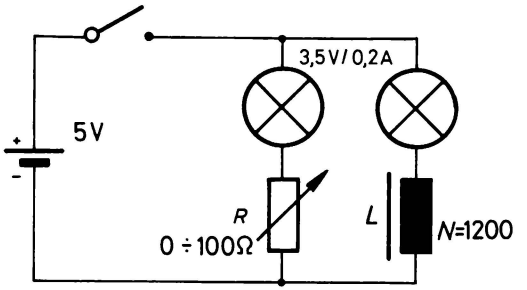


Figure 146

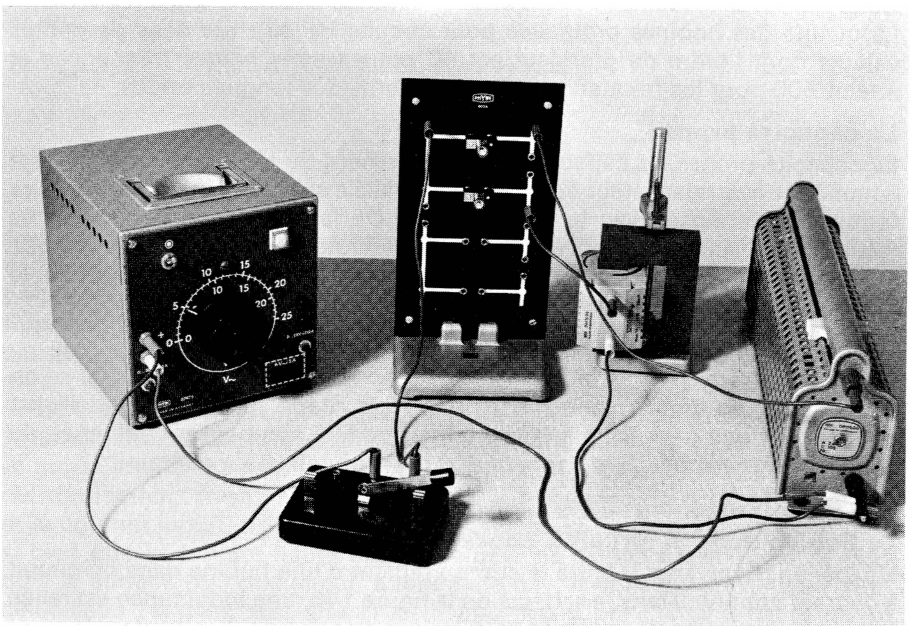


Figure 147

Ceci aurait pour conséquence une variation de champ extrêmement rapide, le champ devrait également passer de la valeur zéro à sa valeur maximale. La contre-tension de self-induction serait énorme. L'expérience précédente nous montre que le courant de self-induction antagoniste affaiblit le courant d'excitation lorsque le champ magnétique augmente. Par conséquent, le courant d'excitation ne peut croître que lentement car il doit vaincre le courant de self-induction antagoniste. La montée du courant est d'autant plus longue que le coefficient de self-induction de la bobine est grand. La figure 147 représente le montage de l'expérience.

Les bobines en circuit série

Les bobines reliées en série peuvent être additionnées en une inductance totale. Dans ce cas, il faut faire une différence entre les bobines qui sont couplées magnétiquement et celles qui ne le sont pas. Les bobines couplées ne sont pas prises en considération car elles seront examinées plus tard en corrélation avec les filtres de bande. Les bobines non couplées ne peuvent pas s'influencer mutuellement. Elles sont soit blindées, soit éloignées l'une de l'autre. Les bobines reliées en série se comportent exactement comme les résistances en série. L'inductance totale est égale à la somme des inductances partielles.

$$L_{tot} = L_1 + L_2 = L_3 + \ldots L_n$$

Le résultat du circuit série est facilement compréhensible lorsque l'on considère que, par la mise en série des bobines, les tensions de self-induction des inductances partielles s'additionnent et que la tension de self-induction est proportionnelle à l'inductance.

Les bobines en circuit parallèle

Des bobines non couplées reliées en parallèle se comportent comme des résistances en parallèle. La valeur réciproque de l'inductance résultante est égale à la somme des valeurs réciproques des inductances partielles.

$$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \ldots \frac{1}{L_n}$$

La constante de temps des circuits RL

Dès l'instant de l'enclenchement, le courant qui passe à travers une inductance pure croît selon une fonction exponentielle et s'approche de sa valeur maximale. Il présente le même comportement que la tension aux bornes d'un condensateur. A l'instant du déclenchement il ne disparaît pas instantanément mais diminue selon une fonction de « e ».
La figure 148 indique ces fonctions.

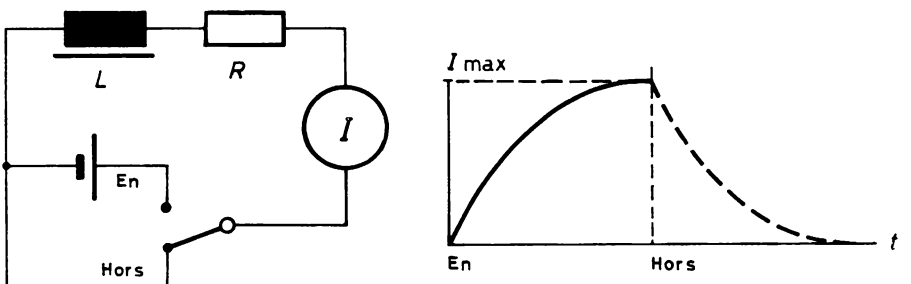


Figure 148

La figure 149 montre le tracé du courant à travers une inductance. Il suit les mêmes lois mathématiques que la courbe de la tension aux bornes du

condensateur. Comme pour le circuit RC, une constante de temps peut aussi être définie pour le circuit RL.
Si le courant croissait avec la vitesse qu'il présente au moment de l'enclenchement, il atteindrait sa valeur maximale après le déroulement d'une constante de temps. Ce parcours supposé du courant est représenté par la tangente de la figure 149.

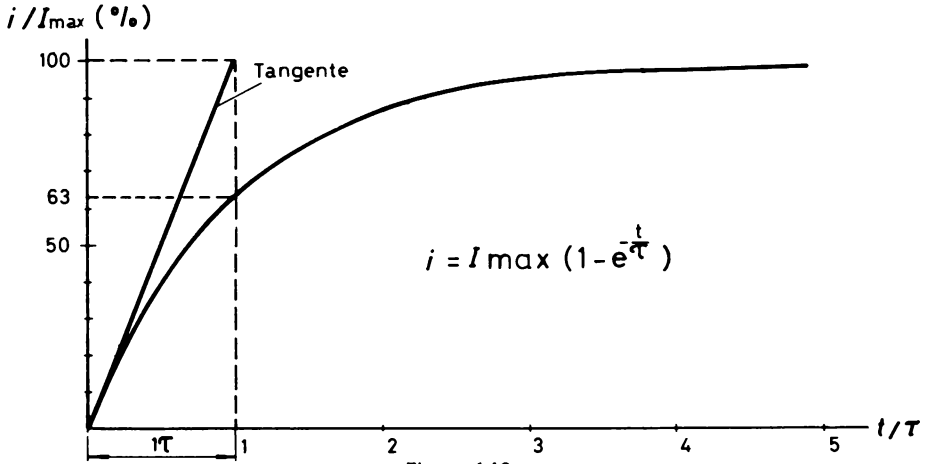


Figure 149

Par suite de la montée exponentielle, le courant n'atteint que le 63% de sa valeur maximale après une constante de temps. Théoriquement il ne peut pas atteindre la valeur maximale donnée par la somme de toutes les résistances ohmiques du circuit. Comme pour le condensateur, les processus peuvent se simplifier; dans la pratique on admet que le courant a atteint sa valeur maximale après 5 constantes de temps.

$$\tau = \frac{L}{R} \qquad [\tau] = \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \frac{\text{A}}{\text{V}} = \text{s}$$

La bobine dans le circuit à courant alternatif

L'expérience, d'après les figures 150 et 151, démontre le comportement de la bobine dans le circuit à courant alternatif. Une bobine de 1200 spires ayant un noyau de fer, fermé sur lui-même, est reliée au réseau 220 V/50 Hz à travers un ampèremètre. L'instrument indique un certain courant. L'armature du noyau est lentement retirée, le courant dans la bobine augmente. En retirant l'armature on a augmenté la résistance magnétique du noyau. Ceci a comme conséquence que le flux magnétique a diminué. Un plus petit champ magnétique indique une inductance plus faible. L'expérience prouve ainsi, que la résistance en courant alternatif de la bobine, diminue lorsque l'inductance s'affaiblit.

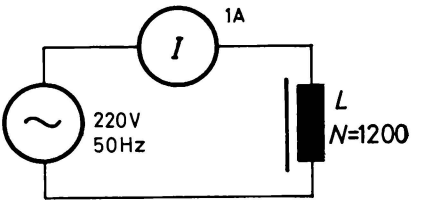


Figure 150

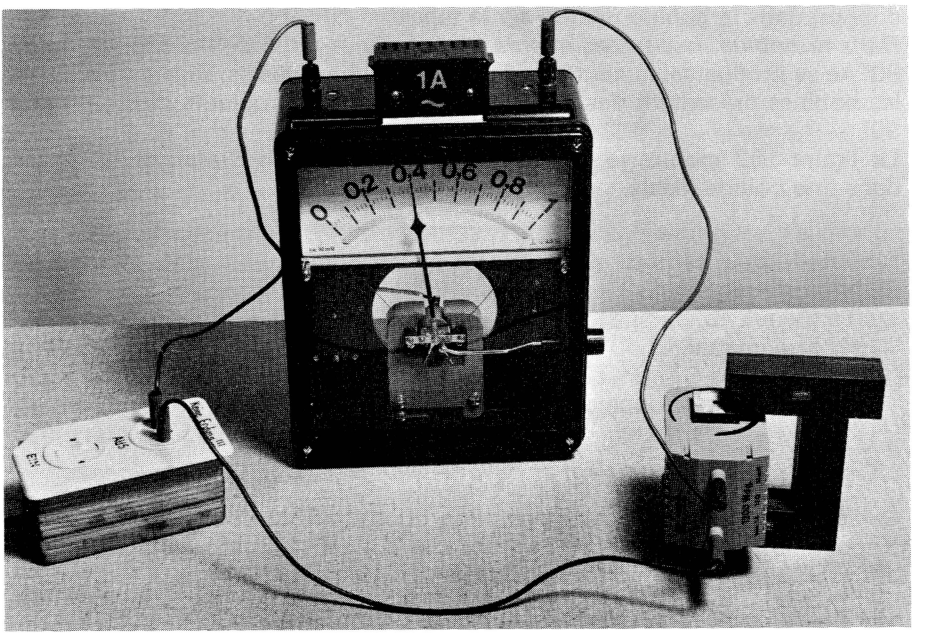


Figure 151

Une tension alternative dans une inductance agit à peu près de la même façon qu'une tension continue dont la polarité serait inversée périodiquement. L'établissement et la disparition du champ magnétique se répète au rythme de la fréquence de la tension alternative. La contre-tension de self-induction qui en résulte est constamment active et empêche une croissance du courant à la valeur qu'il atteindrait avec une tension continue. L'inversion du champ est d'autant plus rapide que la fréquence est élevée d'où il s'ensuit que le courant traversant la bobine diminue.
La résistance qu'une bobine oppose à un courant alternatif se nomme *réactance d'induction*. Dans les formules, on emploie le symbole X_L pour désigner la réactance d'induction.

L'unité de mesure de la réactance d'induction est l'ohm. Par analogie aux notions utilisées pour les capacités, on parle d'induction ou d'inductance.

$$X_L = \omega L \qquad [X_L] = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A} = \Omega$$

La représentation vectorielle du courant et de la tension dans la bobine

Le courant d'excitation à travers la bobine doit vaincre le courant d'induction antagoniste. L'expérience avec les petites lampes a démontré que le courant dans la bobine retarde sur la tension.
Dans la bobine, le courant retarde de 90° sur la tension. Un déphasage de 90° ne se produit seulement que dans des bobines idéales, sans pertes. Dans les bobines présentant des pertes, ce déphasage est toujours plus petit que 90°
La figure 152 montre la représentation vectorielle des rapports de phase dans une bobine idéale.

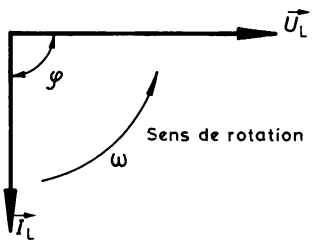


Figure 152

La représentation du courant et de la tension par un diagramme linéaire

La figure 153 montre la représentation du courant et de la tension par un diagramme linéaire. Dans le chapitre des condensateurs nous avons parlé des avantages et des inconvénients de cette présentation.

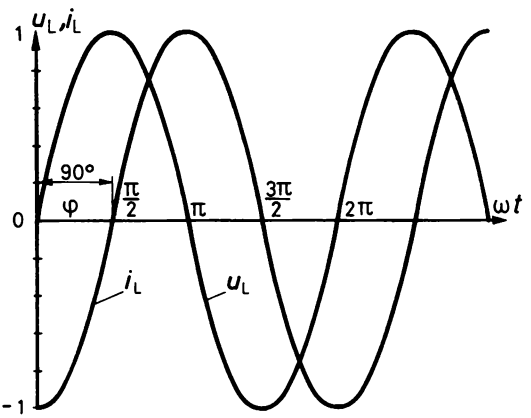


Figure 153

La réactance d'une bobine par rapport à la fréquence

La réactance d'une bobine croît proportionnellement à la fréquence. La figure 154 montre graphiquement ce rapport.

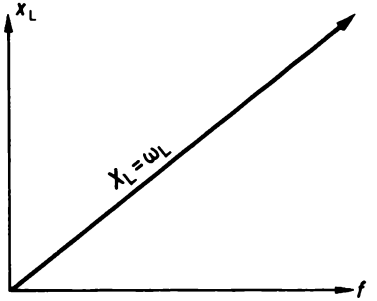


Figure 154

La puissance réactive

Aucune puissance n'est consommée dans une inductance pure. Le produit du courant dans une bobine par la tension à ses bornes a pour résultat, comme pour le condensateur, la puissance réactive. Comme pour le condensateur son unité de mesure est le var. La bobine accumule de l'énergie dans son champ magnétique puis la restitue au réseau. Ce phénomène se répète deux fois par période du courant alternatif. La figure 119 donne la preuve graphique que la puissance réactive est nulle lorsque le déphasage entre le courant et la tension est de 90°.

4. Exemples

a. Calcul de l'inductance d'une bobine avec un noyau de fer

L'inductance de la bobine doit être évaluée d'après les données suivantes:

Caractéristiques de la bobine: Nombre de spires $N = 1200$
Surface du bobinage $A = 5\,cm^2 = 5 \cdot 10^{-4}\,m^2$

Longueur du circuit magnétique: $l = 10\,cm = 0{,}1\,m$
Perméabilité relative $\mu_r = 80$
(pour une intensité déterminée du courant)

Marche à suivre:

– écrire la formule de base

$$L = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$L = \frac{4\pi \cdot 80 \cdot 1{,}44 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^7 \cdot 0{,}1}$$

$$[L] = \frac{Vs}{Am} \cdot \frac{m^2}{m} = \frac{Vs}{A} = H$$

$$L = \mathbf{0{,}723\ H}$$

b. Calcul de la tension induite

La figure 155 montre un schéma qui permet de faire croître linéairement le courant dans la bobine. La thermistance *R* diminue de valeur, selon une courbe exponentielle, dès la fermeture du circuit de façon à ce qu'un courant constant inductif circule dans la bobine. Dans notre exemple, la croissance du courant est linéaire de 0 à 6 A pendant 2 secondes. L'inductance est de 3 H. Quelle est la valeur de la tension induite antagoniste ?

Marche à suivre:

– écrire la formule de base $U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$

– introduire les valeurs et calculer $U = 3 \cdot \frac{6}{2} \quad \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{s}}$

$U = \mathbf{9\ V}$

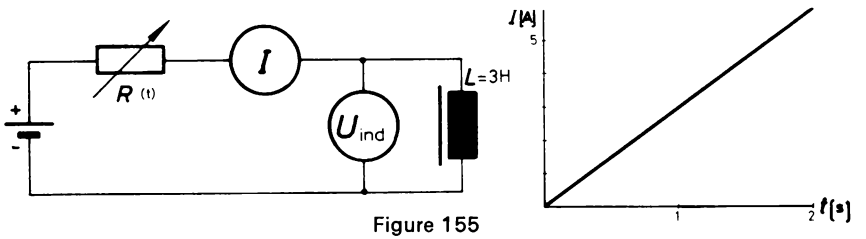


Figure 155

c. Calcul de la constante de temps

La constante de temps du circuit *RL* de la figure 156 doit être calculée

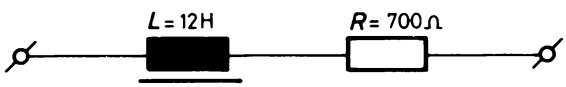


Figure 156

Marche à suivre:

– écrire la formule de base $\tau = \frac{L}{R}$

– introduire les valeurs et calculer $\tau = \frac{12}{0{,}7 \cdot 10^3} \quad \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{V}}$

$\tau = \mathbf{17{,}15\ ms}$

d. Calcul de l'inductance par une mesure de courant et de tension

Une inductance de valeur inconnue est reliée à un générateur haute fréquence. Le courant et la tension sont mesurés. A l'aide du résultat des mesures, la valeur de l'inductance doit être calculée. La figure 157 montre le schéma et les valeurs mesurées.

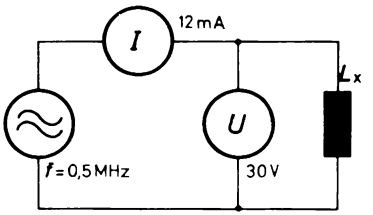


Figure 157

Marche à suivre:

Première étape : calcul de la réactance d'induction ou inductance

– écrire la formule de base $X_L = \frac{U}{I}$

– introduire les valeurs et calculer $X_L = \frac{30}{12 \cdot 10}$

$X_L = 2{,}5\ \text{k}\Omega$

Deuxième étape : calcul de l'inductance

– écrire la formule de base $X_L = \omega L$

– extraire L de la formule $L = \frac{X_L}{\omega}$

– introduire les valeurs et calculer $L = \frac{2{,}5 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 0{,}5 \cdot 10^6} \ \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \text{s}$

$L = \mathbf{0{,}796\ mH}$

5. L'essentiel

On opère une distinction entre les bobines avec noyau de fer et celles qui n'en ont pas. Le noyau augmente l'inductance de la bobine. Le bobinage peut être supporté par un corps de bobine ou construit sans support. La self-induction de la bobine est déterminée par ses dimensions géométriques, le nombre de spires et la perméabilité relative du noyau. L'inductance croît avec le carré du nombre de spires. La perméabilité relative du noyau n'est, en aucun cas, une valeur constante car elle dépend du courant dans la bobine. On utilise souvent des noyaux ayant un entrefer pour réduire l'influence du courant de la bobine.

L'inductance est mesurée en voltsecondes par ampère ou henry (H).

Une bobine représente une inductance de 1 voltseconde par ampère ou de 1 henry lorsque pour une variation constante de 1 ampère pendant 1 seconde, une tension de 1 volt est induite.

Dans les circuits haute fréquence on emploie des bobines à noyau de ferrite ou sans noyau (bobines « sur l'air »). La ferrite des noyaux est une matière possédant de bonnes caractéristiques en haute fréquence, elle ne provoque que de très faibles pertes par courants de Foucault. Dans les étages de puissance des émetteurs et dans les appareils de mesure on utilise souvent des variomètres. Les variomètres sont des bobines dont l'inductance est variable de façon continue.

Les bobines ayant des noyaux de fer feuilleté trouvent leur application dans les circuits de la technique des basses fréquences et dans les cellules de filtrage des redresseurs.
Les pertes dans les bobines se manifestent soit comme des pertes dues à des résistances en série ou en parallèle qui influencent la qualité de la bobine. Le facteur de qualité *Q* est utilisé comme unité de mesure de la qualité d'une bobine. Ce facteur de qualité dépend de la fréquence. La mise en série ou en parallèle de bobines, qui ne sont pas couplées entre elles, se calcule d'après les mêmes règles que celles utilisées lors de la mise en série ou en parallèle des résistances.
La constante de temps d'un circuit *RL* s'obtient en faisant le quotient de l'inductance par la résistance en série. Si un circuit série, composé d'une inductance et d'une résistance, est relié à une source de tension continue le courant dans la bobine croît au 63% de sa valeur maximale pendant la durée d'une constante de temps.
Dans un circuit à courant alternatif, une bobine se comporte comme une résistance. La valeur de cette résistance en courant alternatif est proportionnelle à l'inductance et à la fréquence. Dans la bobine, le courant retarde de 90° sur la tension.
Le produit du courant dans la bobine par la tension à ses bornes se nomme puissance réactive et son unité de mesure est le var.

6. Exercices de répétition (solutions page 452)

a) Une longue bobine « sur l'air », de forme cylindrique possède les caractéristiques suivantes :

Inductance *L*	600 mH
Longueur de la bobine *l*	12 cm
Diamètre de la bobine *d*	4 cm

Calculez le nombre de spires nécessaires.

b) Dans une bobine le courant décroît linéairement de 6 A à 1 A en 0,7 s. Pendant la durée de cette variation de courant une tension de 50 V est induite dans la bobine. Déterminez l'inductance de la bobine.

c) Un circuit *RL* possède une constante de temps de 8 ms. La résistance mesure 200 ohms. Quelle est la valeur de l'inductance de la bobine ?

d) Une bobine en série avec un ampèremètre est reliée à un générateur basse fréquence. Le générateur produit une fréquence de 500 Hz. La tension à la bobine est de 80 V et le courant qui la traverse est de 10 mA. Déterminez la valeur de l'inductance.

e) Selon le schéma de la figure 158, déterminez les courants I_2, I_3 ainsi que la valeur de L_2.

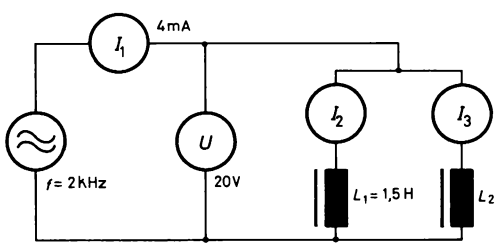


Figure 158

IV. Circuit série composé de résistances et de réactances

1. Introduction

Les inductances et les capacités ne peuvent pas être fabriquées sans pertes, elles présentent toujours une résistance de pertes. Les condensateurs et les bobines comportent toujours, par conséquent, des réactances et des résistances effectives (ou réelles). Le circuit série, composé de réactances et de résistances se rencontre souvent en électrotechnique et en électronique. Ainsi, les moteurs, les transformateurs et les antennes travaillent comme des circuits série d'éléments *RCL*. La qualité de la bobine Q_L et le facteur de pertes tg δ dérivent du circuit série composé de réactances et de résistances. Le facteur de puissance cos φ a une grande importance dans la technique du courant fort, il peut être déterminé à l'aide des composants *RL* d'un circuit série. Les circuits série oscillants représentent un cas particulier du circuit série composé. De toute façon cette énumération pourrait encore être développée. Cela nous montre combien la compréhension du circuit série est importante. Les règles de la trigonométrie, en particulier les fonctions trigonométriques jouent un grand rôle pour expliquer les processus dans les circuits complexes. La représentation de grandeurs alternatives de circuits complexes par un diagramme vectoriel est la règle. Les problèmes dont nous aurons à parler seront, pour vous, l'occasion de faire usage des connaissances que vous avez déjà acquises.

2. Que savez-vous au sujet des circuits composés de réactances et de résistances en série ?

(solutions page 456)

a) Qu'entendez-vous par le terme de « réactance capacitive » ?
b) Qu'est-ce qu'une réactance inductive ?
c) Comment se comportent le courant et la tension dans un condensateur ?
d) Comment se comportent le courant et la tension dans une bobine ?
e) On doit trouver la résistance totale d'un circuit série composé d'une résistance ohmique de 5 ohms et d'une réactance (capacitance) de 8 ohms. Peut-on additionner les deux valeurs ?
f) Qu'entendez-vous par le terme d'impédance ?
g) Que signifie pour vous le terme de « puissance réactive » ?
h) Où le facteur de puissance cos φ joue-t-il un rôle ?

3. Circuit série composé de résistances et de réactances

a. Circuit série composé d'une inductance et d'une résistance ohmique

Le comportement des circuits série est expliqué par l'expérience suivante. Une bobine de 600 spires avec un noyau de fer, sur lequel une armature est posée, est reliée au réseau lumière à travers un ampèremètre selon la figure 159.

La réactance de la bobine est calculée au moyen des valeurs du courant et de la tension. Lors de la mesure suivante, une résistance connue est mise en série avec la bobine. La résistance en courant alternatif est à nouveau évaluée au moyen des valeurs du courant et de la tension.

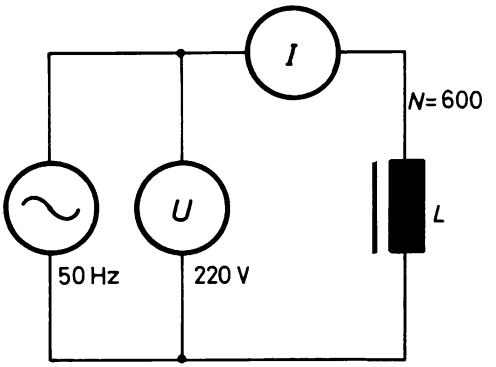


Figure 159

La résistance en courant alternatif du schéma, selon figures 160 et 161, est plus petite que l'addition de la résistance ohmique avec la réactance de la bobine.

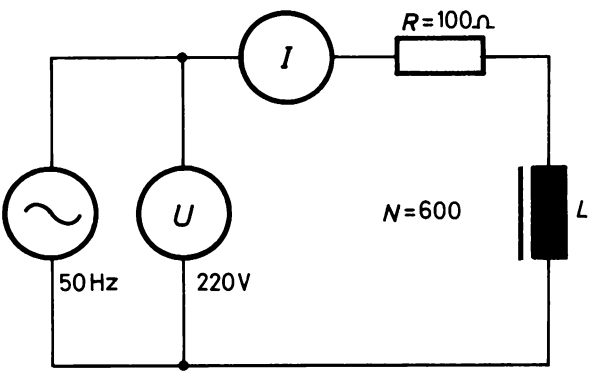


Figure 160

Le résultat de l'essai est évident lorsque l'on considère le déphasage des tensions à travers la résistance et la bobine. La tension de l'inductance avance de 90° par rapport à celle de la résistance. Les valeurs des deux tensions partielles ne peuvent pas être simplement additionnées. La tension totale sur le circuit série correspond à une addition géométrique des tensions partielles. Ces rapports sont représentés graphiquement par un *diagramme vectoriel.*

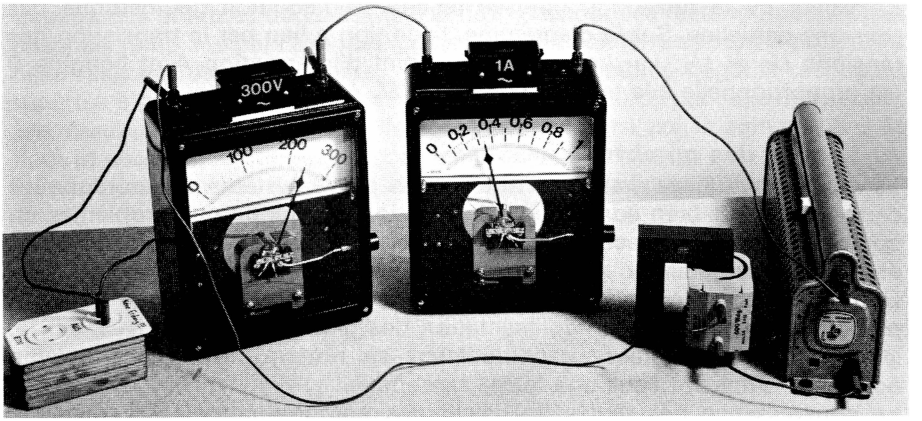


Figure 161

b. Le système cartésien de coordonnées à axes perpendiculaires
Les grandeurs alternatives sont souvent représentées dans un système de coordonnées cartésien. Ce système de coordonnées se compose d'un axe horizontal *x* ou axe des abscisses et d'un axe vertical *y* ou axe des ordonnées. Ces axes se coupent perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. Le point d'intersection des axes se nomme point zéro ou origine. Les valeurs réelles sont reportées sur la partie positive de l'axe des *x* et les réactances sont reportées sur l'axe des *y* en positif ou en négatif, selon leurs déphasages. Sur la figure 162, la tension de la résistance est portée à droite, sur l'axe des *x*. La longueur du vecteur est proportionnelle à la valeur de la tension. La tension sur l'inductance est portée sur l'axe des *y*, vers le haut, avec la même échelle. Les angles sont mesurés dans le sens inverse des aiguilles de montre (sens trigonométrique positif) par conséquent, la tension de l'inductance, qui avance de 90°, se place sur l'axe positif des *y*.

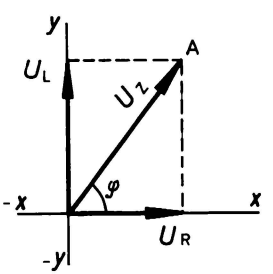


Figure 162

La valeur de la tension composée résulte de l'addition géométrique des tensions partielles. Sur le diagramme, l'addition a lieu par la translation des tensions U_L et U_R. La droite, entre le point d'intersection A et l'origine 0 est proportionnelle à la tension composée U_z.

c. Le plan des nombres de Gauss

La représentation de grandeurs alternatives par le système de coordonnées cartésiennes est bien adapté pour la solution graphique des problèmes en courant alternatif. L'électrotechnique nécessite toutefois un traitement graphique *et* mathématique des problèmes posés. Le plan des nombres de Gauss met à notre disposition un système de coordonnées qui se prête particulièrement bien à la représentation des grandeurs alternatives, car là, les valeurs représentées graphiquement se notent directement comme nombres complexes sous une forme algébrique.
La connaissance des règles de calcul des nombres complexes n'est pas absolument nécessaire pour comprendre l'électrotechnique. Cependant, dans la plupart des thèmes spécialisés, les grandeurs alternatives se représentent par des nombres complexes. Il s'ensuit que les connaissances fondamentales de ce genre de calcul en facilitent la compréhension. Le texte qui suit apporte les concepts de base sans s'étendre, à ce sujet, sur les règles des calculs. En ce qui concerne la représentation dans le plan des nombres de Gauss, l'élève doit en savoir suffisamment de manière à pouvoir lire un diagramme vectoriel.
En algèbre on distingue les *nombres réels et les nombres imaginaires.*

Les nombres réels sont des nombres dont le carré est positif.
Exemples de nombres réels :
5 car $5^2 = 25$, -7 car $-7^2 = 49$, 0,2 car $0{,}2^2 = 0{,}04$, $-0{,}3$ car $-0{,}3^2 = 0{,}09$.

Les nombres imaginaires sont des nombres dont le carré est négatif.
Exemples de nombres imaginaires :
$\sqrt{-9}$ car $(\sqrt{-9})^2 = -9$, $\sqrt{-0{,}16}$ car $(\sqrt{-0{,}16})^2 = -0{,}16$

On ne peut extraire la deuxième racine d'un nombre imaginaire que si l'on introduit une grandeur auxiliaire. Cette grandeur auxiliaire se nomme *unité imaginaire* (ou facteur rotateur) et sa *valeur* est $\sqrt{-1}$. Son symbole est la lettre j.

$$\sqrt{-1} = j;\ j^2 = -1$$

Exemple:
Soit à calculer $\sqrt{-25}$. La règle qui régit l'extraction des racines carrées ne permet pas de résoudre ce problème. Cependant nous pouvons donner une expression de cette racine en la multipliant par le facteur j, à la condition que le résultat soit également multiplié par j.

$$\sqrt{-25} = \sqrt{(-1)\cdot 25} = \sqrt{-1}\cdot\sqrt{25} = \sqrt{-1}\cdot 5 = 5\,j$$

Le plan des nombres de Gauss utilise des coordonnées rectangulaires. L'axe des *x* est remplacé par l'axe réel. Les nombres positifs réels sont reportés sur l'axe réel, à droite de l'origine, tandis que les nombres négatifs réels sont reportés à gauche de l'origine. L'axe des *y* est remplacé par l'axe imaginaire. Les nombres imaginaires positifs sont reportés sur l'axe imaginaire vers le haut et ceux qui sont négatifs sont reportés vers le bas.
Le plan des nombres de Gauss est représenté par la figure 163.

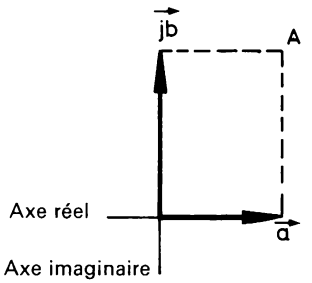


Figure 163

Chaque point de l'un des quatre quadrants peut être défini en donnant sa composante réelle et imaginaire. Le point A de la figure 163 est défini par les composantes a + jb. Le résultat de l'addition d'un nombre réel et d'un nombre imaginaire est un *nombre complexe*.
Pour la représentation de grandeurs alternatives, sur le plan des nombres de Gauss, les règles suivantes sont valables :
- Les résistances effectives, les composantes réelles de tensions et de courants sont toujours reportées sur l'axe réel.
- Les réactances, les composantes réactives de tensions et de courants sont toujours reportées sur l'axe imaginaire.
- Les inductances sont reportées sur l'axe positif imaginaire et les capacitances sur la partie négative de cet axe.

La représentation algébrique de grandeurs alternatives, sur le plan des nombres de Gauss, obéit aux règles suivantes :
- Les valeurs alternatives complexes sont représentées sous la forme de composantes (figure 163 a)

  $$\underline{Z} = R + j\omega L$$

  Le trait sous le *Z* signifie que *Z* est une grandeur complexe. Par cette manière d'écrire l'impédance est déterminée sur le plan des nombres de Gauss. La mise en série, dans un circuit, d'une capacitance et d'une résistance réelle donne la représentation suivante :

  $$\underline{Z} = R + \frac{1}{j\omega C}$$

Le facteur j donne la direction de la réactance. Cette forme est une *manière de représentation.* Lorsque la valeur de l'impédance doit être calculée, la valeur réelle et la valeur imaginaire doivent alors être additionnées. Il en résulte la longueur de la flèche Z qui correspond à la valeur de l'impédance.

– Le facteur j se place toujours avant le symbole de la fréquence angulaire.

$$jX_L = j\omega L$$

$$jX_L = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}$$

– Le facteur j n'influence pas le montant de la valeur qu'il multiplie.
– La multiplication d'un facteur par j signifie une rotation en avant de 90°.
– La multiplication d'un facteur par – j signifie une rotation, en revenant en arrière, de 90°.
– La multiplication de j par lui-même a pour résultat – 1 (car $\sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1} = -1$).

$\frac{1}{j} = -j$. Preuve : multiplier l'expression par j

$$\frac{1}{j} = \frac{j}{j \cdot j} = \frac{\sqrt{-1}}{\sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1}} = \frac{\sqrt{-1}}{-1} = -\sqrt{-1} = -j$$

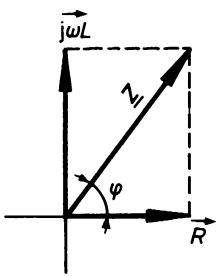


Figure 163a

Exemple :
Figure 163 b, représentation d'une réactance capacitive (capacitance)

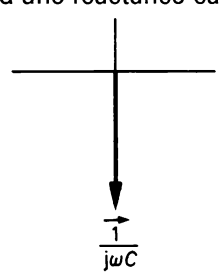


Figure 163b

Selon les règles, la réactance capacitive est reportée sur la partie négative de l'axe des imaginaires. La forme algébrique de l'écriture en tient compte. Selon la règle, le facteur j se place avant le symbole de la fréquence angulaire (pulsation) d'où il en résulte une multiplication par – j car j se trouve sous la barre de fraction. Une multiplication par – j signifie une rotation en sens inverse de 90°.
La figure 163 c donne la représentation d'une réactance inductive (inductance).

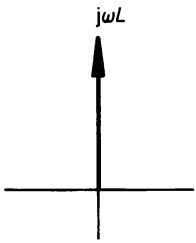


Figure 163c

Selon les règles, la réactance inductive (inductance) est reportée sur la partie positive de l'axe des imaginaires. Algrébriquement, cette rotation de 90° en avant est exprimée par le facteur j qui se trouve devant le symbole de la pulsation.
La figure 163 d donne la représentation d'une résistance effective et d'une inductance reliées en série.

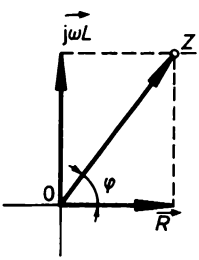


Figure 163d

Selon la règle, la résistance et l'inductance sont reportées sur le dessin et la construction de l'impédance a lieu en effectuant leur translation. La représentation sous la forme des composants s'exprime par :

$$\underline{Z} = R + j\omega L$$

La somme ou valeur absolue de l'impédance complexe $\underline{Z}$ est désignée par la longueur de la flèche $\underline{Z}$ c'est-à-dire la distance entre l'origine et le point $\underline{Z}$.

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Les deux traits verticaux qui encadrent le symbole de l'impédance rendent attentif au fait qu'il s'agit d'une somme c'est-à-dire de la valeur absolue de l'impédance. Le symbole, sans les traits, est utilisé pour la représentation en composantes.

Résumé :
Le plan des nombres de Gauss sert à la représentation graphique de grandeurs alternatives. Les réactances (inductances, capacitances) se reportent sur l'axe imaginaire, les valeurs réelles sur l'axe réel.
La forme composée est une *forme de représentation* algébrique des valeurs sur le plan des nombres de Gauss.
Le calcul des *valeurs* s'effectue selon les règles de la trigonométrie.
Les règles de calcul des nombres complexes ne sont pas expliquées ici. Nous apprenons que la représentation des nombres complexes, pour le traitement mathématique, s'effectue sous la forme de composantes ou sous d'autres formes. Pour le praticien, la représentation sous forme de composantes est intéressante en ce sens que, la direction des valeurs réactives peut se discerner lors de la représentation graphique.

d. Grandeurs des courants alternatifs sur le plan des nombres de Gauss

Le circuit série de la figure 164 doit être représenté graphiquement sur le plan des nombres de Gauss. La résistance effective et l'inductance sont reportées, sur le dessin, selon les règles enseignées. L'impédance $\underline{Z}$ est trouvée par la translation de X_L. L'angle entre la résistance effective et l'impédance $\underline{Z}$ se nomme *angle de phase* φ.
Le produit du courant par la tension totale se nomme *puissance apparente.* C'est celle qui semble être utilisée par l'impédance. Les symboles les plus utilisés pour la puissance apparente sont S et P_s.
L'unité de mesure est le VA ou voltampère

$$P_s = U \cdot I \text{ (valeurs effectives)}$$

La puissance active est celle qui est effectivement transformée en une autre forme d'énergie dans l'impédance. Elle correspond à la puissance prélevée par les résistances effectives.
Le symbole de la puissance active est P.
L'unité de mesure est le watt (W).

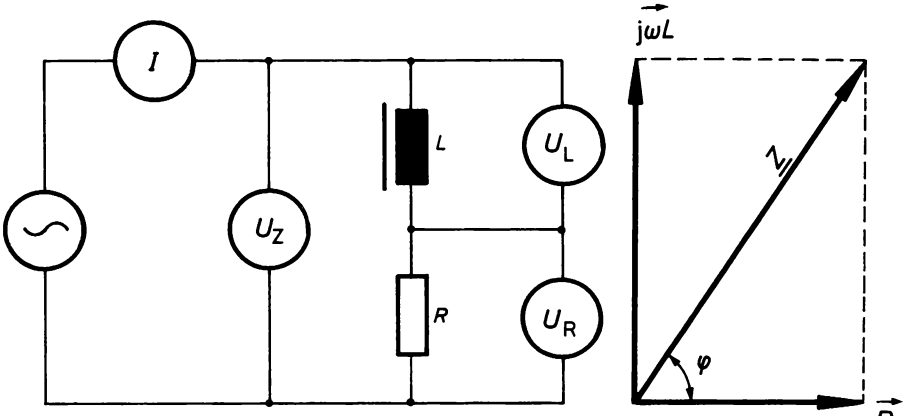


Figure 164

La puissance active se calcule facilement à l'aide du diagramme vectoriel. Elle correspond au produit du courant par la tension sur la résistance effective.

$$P = I \cdot U_R \text{ (valeurs effectives)}$$

Dans un circuit série, les résistances et les tensions ont un comportement proportionnel les unes par rapport aux autres. Le rapport entre la tension sur la résistance effective U_R et la tension composée U_Z correspond au rapport entre la résistance effective R et l'impédance $|\underline{Z}|$. Ce quotient est égal au cosinus du déphasage φ.
Nous obtenons la puissance active de cette façon :

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ (valeurs effectives)}$$

Le facteur de puissance cos φ permet de calculer la puissance active qui est utilisée dans l'impédance.
Pour un circuit série on l'obtient par la formule :

$$\cos \varphi = \frac{R}{|\underline{Z}|}$$

La puissance réactive est celle qui semble être utilisée dans les réactances. C'est une grandeur purement formelle sans signification physique. Mais on peut très bien l'utiliser à des fins de calcul.
Les symboles les plus utilisés pour la puissance réactive sont Q et P_q (comparer avec la page 165).
L'unité de mesure est le *var* ou voltampère réactif.
La puissance réactive peut également être évaluée au moyen d'un diagramme vectoriel. Le rapport entre la tension U_L et la tension composée U_Z correspond à celui qui existe entre la réactance X_L et l'impédance $|\underline{Z}|$. Ce quotient est égal au sinus du déphasage φ. Il s'ensuit que la puissance réactive est :

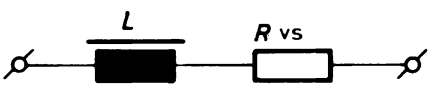
$$P_q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Le facteur de la puissance réactive sin φ est utilisé pour calculer la puissance réactive qui est prélevée par les impédances.
Pour un circuit série il se calcule selon :

$$\sin \varphi = \frac{X_L}{|\underline{Z}|}$$

Le facteur de qualité Q_L est une mesure qui définit la qualité d'une bobine. Toutes les pertes dans la bobine sont résumées en une résistance série des pertes. Le rapport entre la réactance et la résistance effective donne la qualité de la bobine (facteur de qualité).

$$Q_L = \frac{X_L}{R}$$



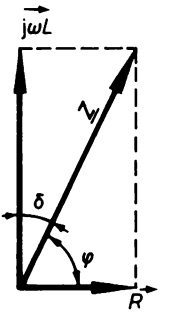


Figure 165

La figure 165 montre le diagramme vectoriel d'une bobine ayant des pertes.

$$Q_L = \frac{\omega_L}{R_v} = \text{tg } \varphi = \frac{1}{\text{tg } \delta} \qquad [Q_L] = \frac{\text{Vs} \cdot \text{A}}{\text{s} \cdot \text{A} \cdot \text{V}} = \text{sans dimension}$$

L'angle de pertes δ est l'angle complémentaire de l'angle du déphasage φ. Pour une inductance pure il tombe à zéro car l'angle du déphasage est de 90° ; la tangente est également nulle, ce qui signifie que la qualité de la bobine serait idéale ($Q_L = \infty$). Cette conclusion est exacte puisqu'une inductance pure ne présente pas de pertes.

e. Circuit série composé d'une capacitance

L'essai suivant montre le comportement d'un circuit *RC*. Avant tout, la capacitance d'un condensateur est déterminée par une mesure technique selon la figure 166. Une résistance effective est mise en série avec cette capacitance. L'impédance est calculée à partir des mesures du courant et de la tension. Le résultat indique une plus petite valeur pour l'impédance que si l'on additionne séparément la résistance effective et la capacitance. Les rapports sont les mêmes que pour le circuit *RL*. Par suite du déphasage de 90° entre le courant et la tension dans la réactance capacitive, les valeurs des résistances doivent être additionnées géométriquement.

Puisque la tension au condensateur retarde par rapport à celle sur la résistance, la réactance capacitive est reportée sur la partie négative de l'axe imaginaire. La figure 169 montre la représentation graphique du diagramme vectoriel sur le plan des nombres de Gauss.

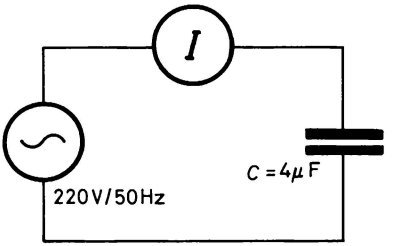


Figure 166

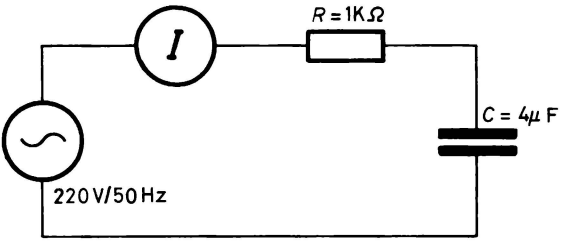


Figure 167

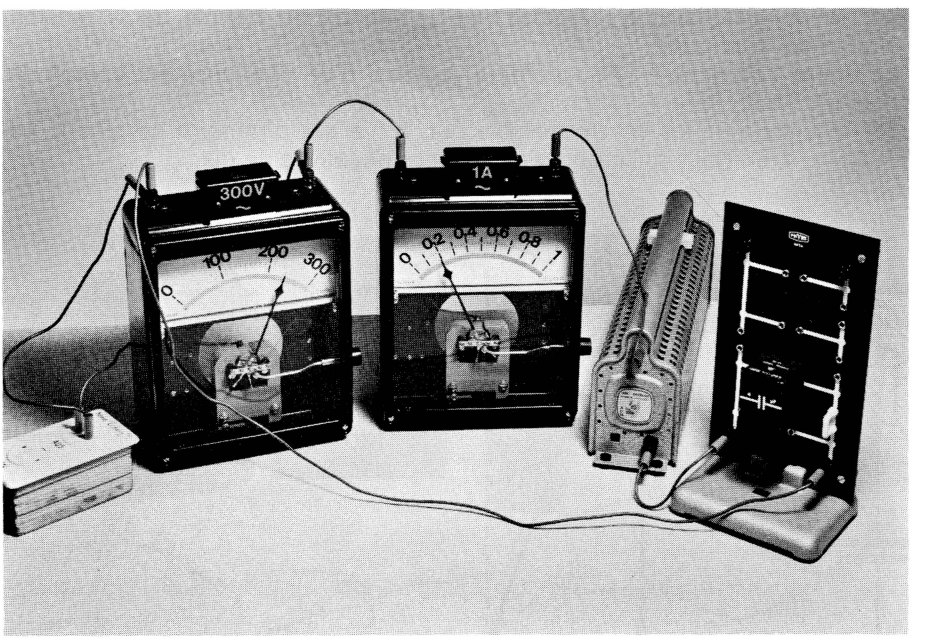


Figure 168

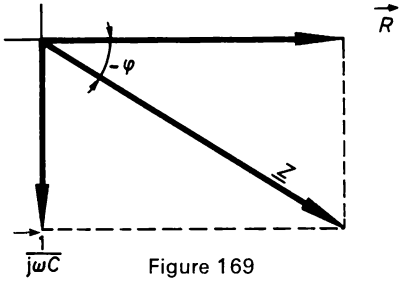
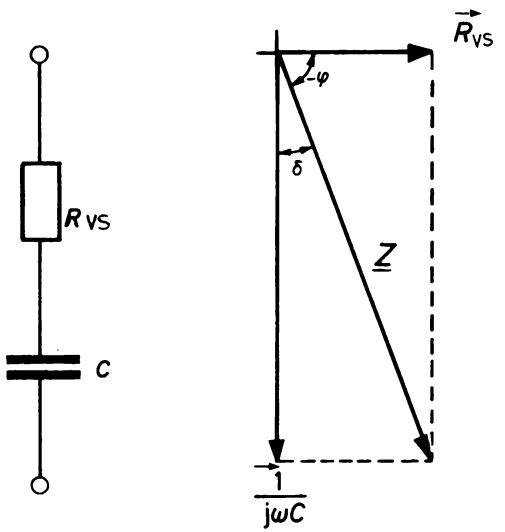


Figure 169

Les règles pour le calcul de la puissance réelle, réactive et apparente du circuit série *RL* s'appliquent également au circuit série *RC*.
Les pertes dans le condensateur sont exprimées par le *facteur de pertes tg* δ. Toutes les pertes du condensateur se résument en une résistance de pertes série. Plus cette résistance de pertes série est petite, d'autant plus faibles seront les pertes. La tangente de l'angle de pertes correspond au facteur de pertes. Par analogie à la bobine, une capacité pure ne présente pas de pertes et la tangente de l'angle de pertes est nulle. Le facteur de pertes n'est pas une grandeur constante, il dépend de la fréquence. Par conséquent, la résistance de pertes série est également dépendante de la fréquence car la plus grande part des pertes ohmiques est reportée sur les pertes dans le diélectrique. Ces pertes dans le diélectrique proviennent du travail requis par les molécules et les atomes pour s'orienter au rythme de la tension alternative appliquée.
La figure 170 montre le diagramme vectoriel d'un condensateur chargé de pertes.
Le facteur de pertes est un nombre pur, il n'a pas d'unité. Il est donné en pour-cent, en pour-mille ou en puissances négatives de dix.



$$\operatorname{tg}\delta = \frac{R_{vs}}{X_c} = \frac{R_{vs}}{\frac{1}{\omega C}}$$

$$\operatorname{tg}\delta = R_{vs} \cdot \omega C \qquad \left[\frac{V}{A} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{As}{V} = 1\right]$$

Figure 170

f. Circuit série composé d'inductance, de capacitance et de résistance (circuit RLC)

Les réactances et les résistances de l'expérience selon les figures 171 et 172 sont déterminées par une mesure de tension et de courant. Le courant et la tension aux bornes du circuit donnent la valeur de l'impédance qui dépend considérablement de la valeur de la somme des résistances partielles.

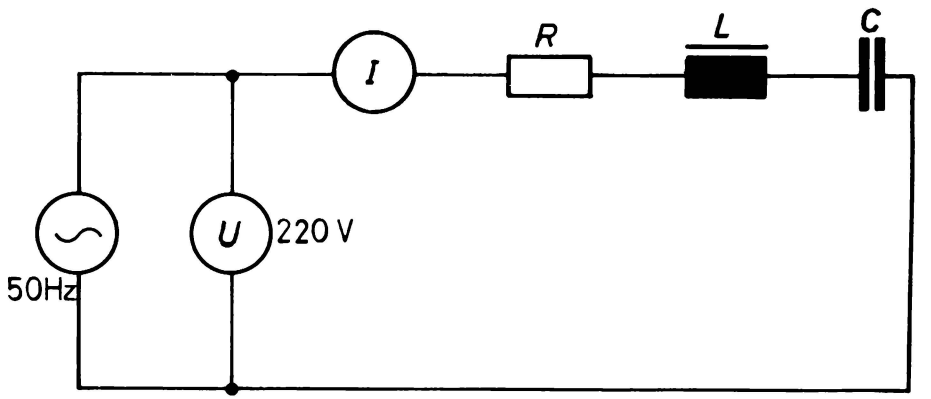


Figure 171

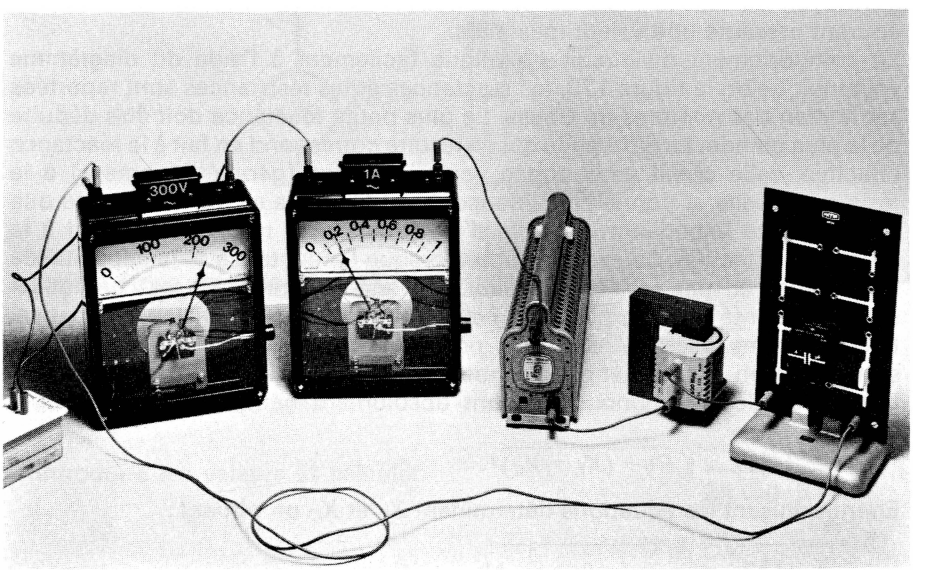


Figure 172

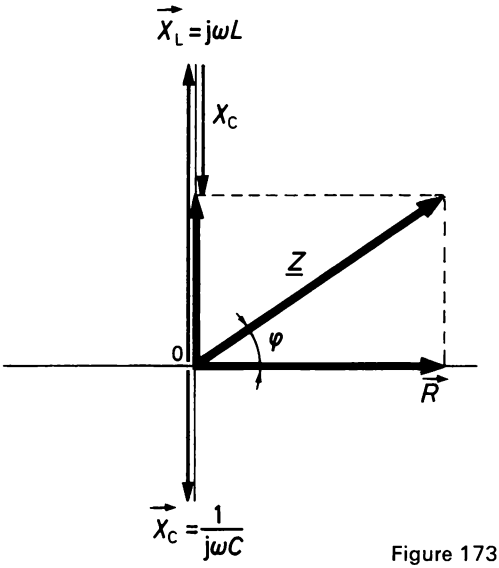


Figure 173

$$\underline{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

$$\underline{Z} = R + j\,(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

L'armature de la bobine peut être déplacée ce qui permet de varier ainsi la valeur de l'inductance et simultanément provoque une variation du courant au moyen de l'inductance. Pour une position déterminée de l'armature le courant présente une valeur maximale.
Le comportement du circuit s'explique facilement à l'aide du diagramme vectoriel. Selon la figure 173, les réactances et les résistances sont reportées sur le plan des nombres de Gauss. La plus petite réactance doit être déduite de la plus grande. La différence qui en résulte correspond en fait à la réactance effective, celle-ci est additionnée vectoriellement (géométriquement) à la résistance réelle et donne l'impédance. Il est facile de se rendre compte que la plus petite impédance possible d'un circuit série mixte correspond à la résistance effective. Ce cas se produit lorsque l'inductance et la capacitance sont égales et, par conséquent, leur effet est supprimé. Ce cas particulier sera commenté plus tard lors de l'étude du circuit oscillant en résonance.
Le diagramme vectoriel des trois possibilités, pour un circuit série, peut se traduire en une équation qui nous permet de calculer les impédances. Les règles de la trigonométrie sont absolument nécessaires pour établir l'équation.

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

En introduisant les équations déterminant X_L et X_C on obtient :

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

Cette équation est utilisable pour tous les circuits série composés de R, L et C où un élément manquant éventuellement dans la formule peut être laissé de côté. Cela ne joue également aucun rôle, que l'une des deux réactances soit plus grande que l'autre. Si une valeur négative se présente dans la parenthèse le signe moins disparaît lors de l'élévation au carré de l'expression.

4. Exemples

Marche à suivre en général:

- En tout premier, nous établissons les équations sous la forme de composantes.
- Mais puisque pour les calculs suivants nous admettons un déphasage entre le courant et la tension de respectivement + 90° pour les inductances et − 90° pour les capacitances, nous remplaçons tout de suite les vecteurs complexes par leurs valeurs (valeurs effectives) et ne tenons pas compte de leur sens.

a) Déterminer les grandeurs suivantes selon le schéma de la figure 174 :

- Le courant I à travers l'impédance
- Le déphasage (tg φ)
- L'impédance Z
- La puissance active P
- La puissance apparente P_s
- La puissance réactive P_q
- Le diagramme vectoriel des résistances
- Le diagramme vectoriel des tensions

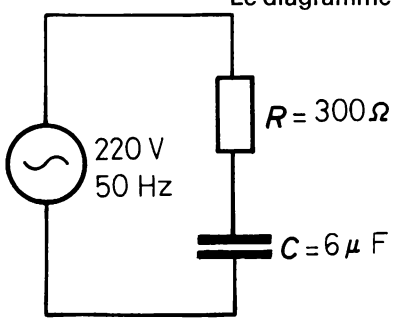


Figure 174

Marche à suivre:

Première étape : calculer la réactance capacitive X_C

- sous forme de composantes $\quad X_C = \dfrac{1}{j\omega C}$
- écrire la formule de base $\quad X_C = \dfrac{1}{\omega C}$
- introduire les valeurs et calculer $\quad X_C = \dfrac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}$

$$[X_C] = s \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_C = 530\,\Omega$$

Deuxième étape : dessiner le diagramme vectoriel des résistances

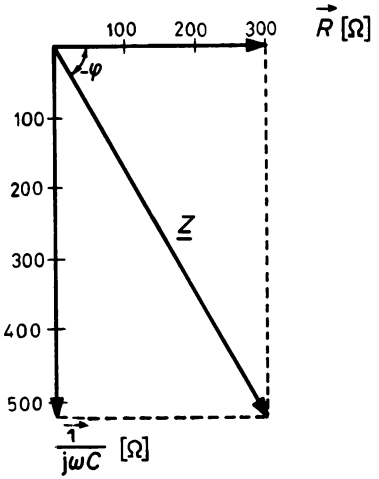


Figure 175

Troisième étape: calcul de l'impédance Z

– *sous forme de composantes*

$$\underline{Z} = R + \frac{1}{j\omega C} = R - j\,\frac{1}{\omega C}$$

– *écrire la formule de base*

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (-\frac{1}{\omega C})^2}$$

– *introduire les valeurs et calculer*

$$|\underline{Z}| = \sqrt{300^2 + 530^2}$$

$$Z = |\underline{Z}| = \mathbf{609\ \Omega}$$

Quatrième étape : calcul du courant I

– écrire la formule de base (valeurs effectives)

$$I = \frac{U}{Z}$$

– Introduire les valeurs et calculer

$$I = \frac{220}{609}\ \frac{V}{\Omega}$$

$$I = \mathbf{0{,}362\ A}$$

Cinquième étape : calcul de tg φ

– écrire la formule de base

$$\text{tg}\ \varphi = \frac{-\frac{1}{\omega C}}{R} = -\frac{1}{\omega CR}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$\text{tg}\ \varphi = \frac{530}{300}\ \frac{\Omega}{\Omega}$$

$$\text{tg}\ \varphi = \mathbf{-\ 1{,}77}$$

– Déphasage $\varphi = -60° 30'$, c'est-à-dire que, dans l'impédance Z, la tension retarde de 60° 30' sur le courant.
– Le rapport entre la capacitance ou l'inductance et la résistance réelle détermine le déphasage.

Sixième étape : calcul des tensions U_C et U_R

– écrire la formule de base $U_C = I \cdot X_C$; $U_R = I \cdot R$
– introduire les valeurs et calculer
$U_C = 0{,}362 \cdot 530$
$U_C = 192$ V
$U_R = 0{,}362 \cdot 300$
$U_R = 108{,}5$ V

Septième étape : dessiner le diagramme vectoriel des tensions

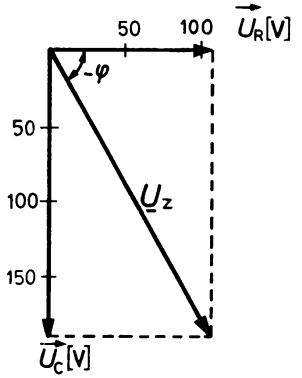


Figure 176

Huitième étape : calcul des puissances

– écrire la formule de base de sin φ et de cos φ $\sin \varphi = \frac{X_C}{Z}$; $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$

– introduire les valeurs et calculer $\sin \varphi = \frac{530}{609}$; $\cos \varphi = \frac{300}{609}$

$\sin \varphi = 0{,}870$; $\cos \varphi = 0{,}493$

– écrire les formules de base des puissances $P_S = U \cdot I$
$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$
$P = P_S \cdot \cos \varphi$
– introduire les valeurs et calculer $P_S = 220 \cdot 0{,}632$
$P_S =$ **79,5 VA**
$P_q = 79{,}5 \cdot 0{,}870$
$P_q =$ **69,5 vars**
$P = 79{,}5 \cdot 0{,}493$
$P =$ **39,2 W**

Neuvième étape : vérification ; P et P_q peuvent également être calculés avec I, U_R et U_C. Dans ce cas, la puissance active est égale au courant fois la tension à la résistance ohmique et la puissance réactive se calcule en multipliant le courant I par la tension au condensateur.
Lorsque le résultat de ces calculs est le même que précédemment alors les calculs restants sont également exacts :

– écrire les formules des puissances

$$P = U_R \cdot I$$
$$P_q = U_C \cdot I$$

– introduire les valeurs et calculer

$$P = 108{,}5 \cdot 0{,}362$$
$$P = 39{,}2 \text{ W}$$
$$P_q = 192 \cdot 0{,}362$$
$$P_q = 69{,}5 \text{ vars}$$

Dixième étape : rassembler les résultats

I = **0,362 A**	tg φ = **– 1,77**	Z = **608 ohms**
P = **39,2 W**	P_S = **79,5 VA**	P_q = **69,5 vars**

b) calculer les valeurs suivantes d'après le schéma de la figure 177 :
– L'impédance Z
– Le courant à travers l'impédance
– La puissance active P
– La puissance réactive P_q
– La puissance apparente P_S
– Dessiner le diagramme vectoriel des résistances
– Dessiner le diagramme vectoriel des tensions

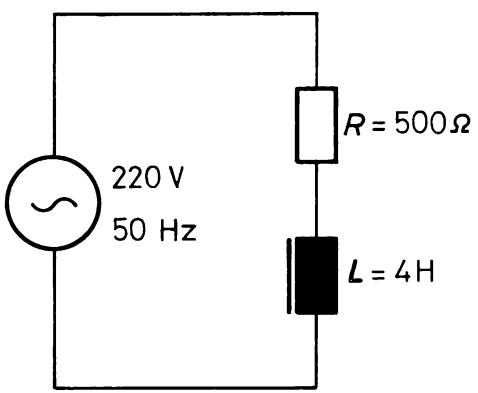


Figure 177

La résolution de ce problème s'effectue de la même manière que pour l'exercice a. On indiquera comment le problème peut être résolu en moins d'étapes par la réunion des processus de calcul partiels.

Marche à suivre:
Première étape: calcul de l'impédance et du courant en un calcul groupé

– *sous forme de composantes* $\underline{I} = \dfrac{U}{R + j\omega L}$

– écrire la formule de I $I = \dfrac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$

– introduire les valeurs et calculer $I = \dfrac{220}{\sqrt{500^2 + (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4)^2}} \dfrac{V}{\Omega}$

$I = \dfrac{220}{1352} \dfrac{V}{\Omega}$

$I = \mathbf{0{,}1625\ A}$

$Z = |\underline{Z}| = \mathbf{1325}\ \Omega$

Deuxième étape: calcul de sin φ et de l'inductance en un calcul groupé

– écrire la formule de sin φ $\sin \varphi = \dfrac{\omega L}{Z}$

– introduire les valeurs et calculer $\sin \varphi = \dfrac{2\pi \cdot 50 \cdot 4}{1352} = \dfrac{1256}{1352}$

$\sin \varphi = 0{,}93$

$X_L = 1256\ \Omega$

Troisième étape: calcul du facteur de puissance cos φ

– écrire la formule de base du cos φ $\cos \varphi = \dfrac{R}{Z}$

– introduire les valeurs et calculer $\cos \varphi = \dfrac{500}{1352}$

$\cos \varphi = 0{,}37$

Quatrième étape: calcul des puissances

– écrire les formules des puissances $P_S = U \cdot I$

$P = P_S \cdot \cos \varphi$

$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$

– introduire les valeurs et calculer $P_S = 200 \cdot 0{,}1625$

$P_S = \mathbf{35{,}7\ VA}$

$P = 35{,}7 \cdot 0{,}37$

$P = \mathbf{13{,}20\ W}$

$P_q = 35{,}7 \cdot 0{,}93$

$P_q = \mathbf{33{,}2\ vars}$

Cinquième étape : calcul des tensions U_L et U_R lié avec le contrôle simultané des autres calculs

– écrire les formules de base des tensions et des puissances

$U_L = I \cdot X_L$ $\quad P_q = U_L \cdot I = I^2 \cdot X_L$

$U_R = I \cdot R$ $\quad P = U_R \cdot I = I^2 \cdot R$

– introduire les valeurs et calculer

$U_L = 0{,}1625 \cdot 1256$ $\quad P_q = 0{,}1625 \cdot 204$

$U_L = \mathbf{204\ V}$ $\quad P_q = 33{,}2$ vars

ou $P_q = 0{,}1625^2 \cdot 1256 = 33{,}2$ vars

$U_R = 0{,}1625 \cdot 500$ $\quad P = 0{,}1625 \cdot 81{,}25$

$U_R = \mathbf{81{,}25\ V}$ $\quad P = 13{,}20$ W

ou $P = 0{,}1625^2 \cdot 500 = 13{,}20$ W

Sixième étape : rassembler les résultats

$Z = \mathbf{1352\ \Omega}$ $\quad I = \mathbf{0{,}1625\ A}$ $\quad P_S = \mathbf{35{,}7\ VA}$

$P = \mathbf{13{,}20\ W}$ $\quad P_q = \mathbf{33{,}2\ vars}$

Septième étape : dessiner les diagrammes

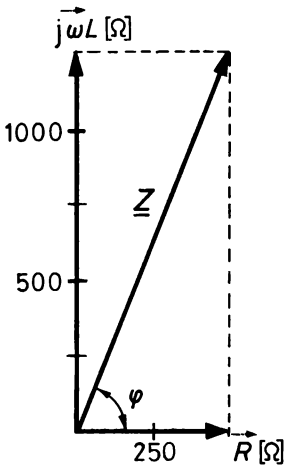


Figure 178

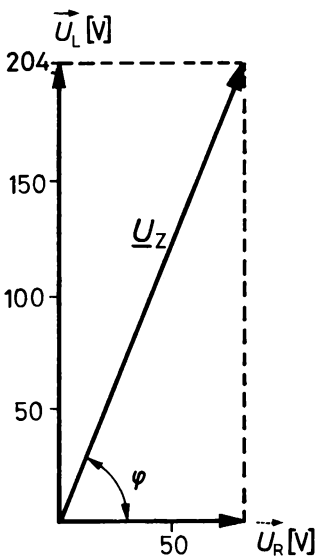


Figure 179

c) Calculer la résistance de perte série du condensateur de la figure 180.

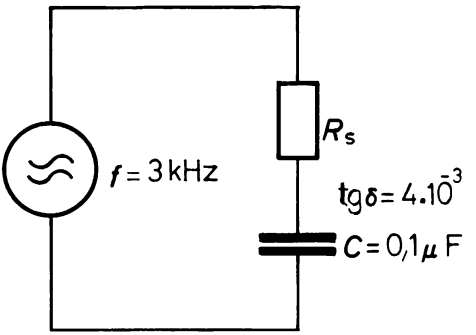


Figure 180

Marche à suivre:

– écrire la formule de base de tg δ (voir page 208)

$$\text{tg } \delta = R_s \cdot \omega \cdot C$$

– extraire R_s de la formule

$$R_s = \frac{\text{tg } \delta}{\omega C}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$R_s = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_s = \mathbf{2{,}12\ \Omega}$$

d) Calculer la qualité de la bobine, ayant des pertes, selon la figure 181.

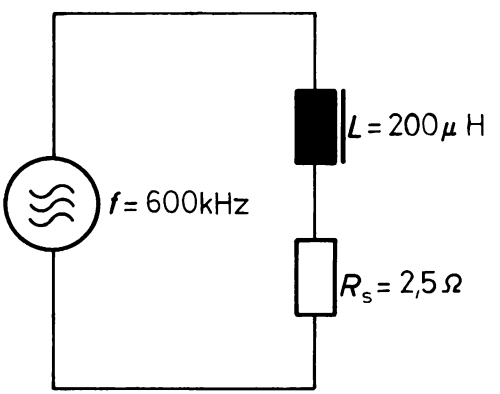


Figure 181

Marche à suivre:

– écrire la formule de base déterminant la qualité de la bobine (voir page 206)

$$Q_L = \frac{\omega L}{R_s}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$Q_L = \frac{2\pi \cdot 0{,}6 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2{,}5}$$

$$Q_L = \mathbf{302}$$

e) Calculer les valeurs suivantes d'après le schéma de la figure 182 :
- Impédance Z et déphasage φ
- Puissance active P
- Puissance apparente P_S
- Puissance réactive P_q
- Dessiner le diagramme vectoriel des résistances

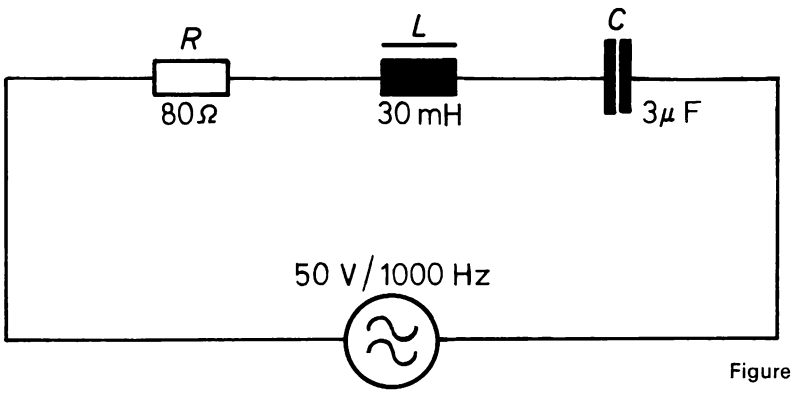


Figure 182

Marche à suivre:
Première étape : calcul de Z

- sous forme de composantes $\quad \underline{|Z|} = R + j\omega L + \dfrac{1}{j\omega C}$
- écrire la formule de calcul $\quad \underline{|Z|} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \dfrac{1}{\omega C}^2)}$
- introduire les valeurs et calculer

$$\underline{|Z|} = \sqrt{80^2 + (2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-6}})^2}$$

$$Z \equiv \underline{|Z|} = \mathbf{157{,}3}\ \Omega$$

$$\varphi = \text{arctg}\ \varphi, \quad = \text{arc}\frac{X}{R} = \mathbf{59{,}4}^\circ$$

Deuxième étape : calcul de cos φ et de sin φ

- écrire la formule pour calculer cos φ $\quad \cos\varphi = \dfrac{R}{Z}$
- introduire les valeurs et calculer $\quad \cos\varphi = \dfrac{80}{157{,}3}$

$$\cos\varphi = 0{,}508$$

– écrire la formule pour calculer sin φ

$$\sin \varphi = \frac{(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{Z}$$

– introduire les valeurs abrégées et calculer

$$\sin \varphi = \frac{(2\pi \cdot 30 - \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-3}}}{157{,}3}$$

$$\sin \varphi = 0{,}86$$

Troisième étape : calcul des puissances

– écrire la formule pour calculer les puissances

$$P_S = \frac{U^2}{Z}$$

$$P = P_S \cdot \cos \varphi$$

$$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$$

– introduire les valeurs et calculer

$$P_S = \frac{50^2}{157{,}3}$$

$$P_S = \mathbf{15{,}88\ VA}$$

$$P = 15{,}88 \cdot 0{,}508$$

$$P = \mathbf{8{,}07\ W}$$

$$P_q = 15{,}88 \cdot 0{,}86$$

$$P_q = \mathbf{13{,}65\ vars}$$

Quatrième étape : calcul des résistances et contrôle des autres calculs

– sous forme de composantes

$$[X_L] = j\omega L\ ;\ [X_C] = \frac{1}{j\omega C}$$

– écrire les formules de base de la réactance

$$X_L \equiv |X_L| = \omega L \quad X_C \equiv |X_C| = \frac{1}{\omega C}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$X_L = 2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-3}$$

$$[X_L] = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_L = 188{,}5\ \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^{-6}}$$

$$[X_C] = s \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_C = 53{,}1\ \Omega$$

– Contrôle des puissances

– écrire les formules de base des puissances

$$P = I^2 \cdot R \quad I = \frac{U}{Z}$$

$$P_q = I^2 \cdot (X_L - X_C)$$

– introduire les valeurs et calculer

$$I = \frac{50}{157{,}3}$$

$$I = 0{,}318\ A$$

$P = 0{,}318 \cdot 80$
$P = 8{,}07$ W
$P_q = 0{,}318 \cdot 135{,}4$
$P_q = 13{,}65$ vars

Cinquième étape : rassembler les résultats et dessiner le diagramme vectoriel

$Z =$ **157,3 ohms** $\quad \cos \varphi =$ **0,508** $\quad P =$ **8,07 W**
$\varphi =$ **59,4°** $\quad \sin \varphi =$ **0,86** $\quad P_S =$ **15,88 VA**
$P_q =$ **13,65 vars**

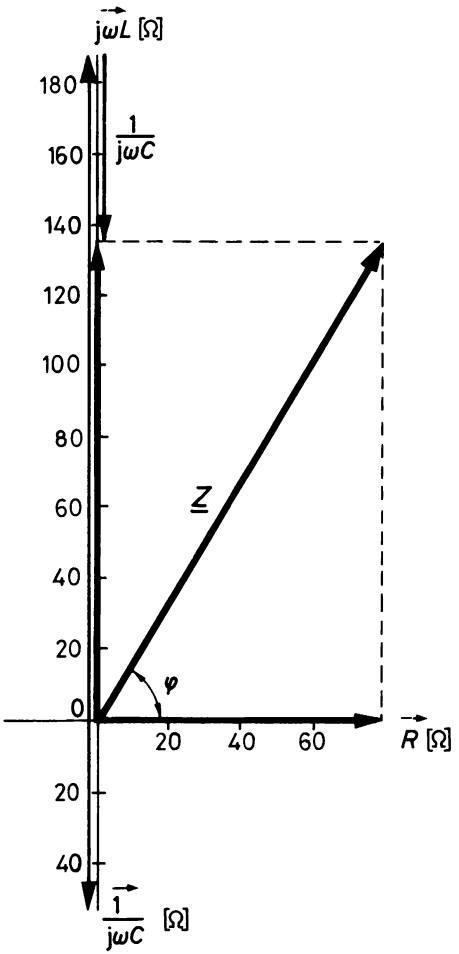


Figure 183

f) Selon le schéma de la figure 184, calculer la tension aux bornes de la résistance. Le calcul doit être vérifié au moyen du diagramme vectoriel.

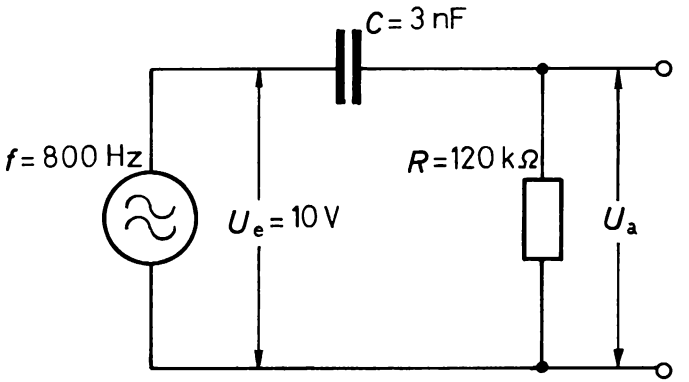


Figure 184

Marche à suivre:
Première étape: calcul de X_C et de Z

Sous la forme de composantes $\quad X_C = \dfrac{1}{j\omega C}$

– écrire la formule de base de X_C $\quad X_C = |X_C| = \dfrac{1}{\omega C}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad X_C = \dfrac{1}{2\pi \cdot 0{,}8 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-9}}$

$$[X_C] = \frac{s\,V}{As} = \frac{V}{A}$$

$$X_C = 66{,}3\ k\Omega$$

– écrire la formule de base de Z $\quad |\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + X_C^2}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad |\underline{Z}| = \sqrt{(66{,}3 \cdot 10^3)^2 + (120 \cdot 10^3)^2}$

$$Z = |\underline{Z}| = 137{,}1\ k\Omega$$

Deuxième étape: calculer la tension aux bornes de R

– écrire la formule de U_a $\quad U_a = \dfrac{U_Z}{Z} R$

– introduire les valeurs et calculer $\quad U_a = \dfrac{10 \cdot 120 \cdot 10^3}{137{,}1 \cdot 10^3} \dfrac{V\,\Omega}{\Omega}$

$$U_a = \mathbf{8{,}75\ V}$$

Troisième étape: contrôle du calcul à l'aide du diagramme vectoriel
– dessiner le diagramme vectoriel des résistances (1 cm = 20 kΩ)
– prolonger l'axe de Z pour qu'il atteigne 10 cm, ainsi, sur cet axe, 1 cm = 1 V
– projeter l'axe de Z, ainsi rallongé, sur l'axe de R. Mesurer U_a sur l'axe de R.

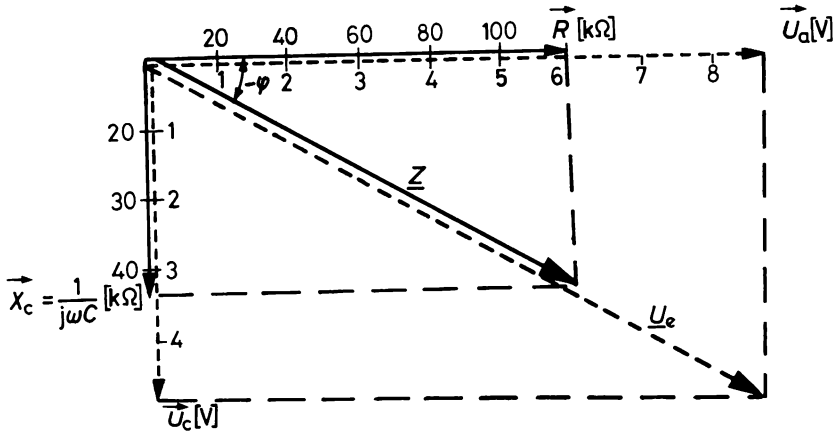


Figure 185

5. L'essentiel

Les grandeurs alternatives sont représentées sur le plan des nombres de Gauss. Les résistances et les conductances réelles ainsi que les valeurs effectives des tensions et des courants sont reportés sur l'axe horizontal ou axe réel. Sur l'axe imaginaire, vertical, les réactances et les conductances réactives ainsi que les tensions et les courants réactifs sont représentés. Le sens de rotation pour la représentation des déphasages est l'inverse de celui des aiguilles de montre (sens antihoraire). Les tensions partielles aux bornes des divers composants d'un circuit série comportant des résistances effectives et des réactances sont additionnées géométriquement.

Les résistances réelles et les réactances d'un circuit série sont traitées de la même façon, dans les calculs, que les tensions partielles du circuit.

La résistance en courant alternatif d'un circuit composé de résistances réelles (ou effectives) et de réactances s'appelle l'impédance.

Dans le circuit à courant alternatif on distingue trois sortes de puissances: la puissance active qui correspond à la puissance transformée en une autre forme d'énergie dans les résistances réelles. La puissance réactive est le produit du courant par la tension à travers la composante réactive du circuit. Enfin, par le terme de puissance apparente on entend la puissance qui semble être absorbée par l'impédance.

Le cosinus de l'angle de déphasage φ permet un calcul simple de la puissance active. Si l'on multiplie la puissance apparente par le facteur de puissance $\cos \varphi$ on obtient ainsi la puissance active.

Le sinus de l'angle de déphasage φ se nomme facteur de puissance réactive. Si l'on multiplie la puissance apparente par ce facteur on obtient ainsi la puissance réactive du circuit.

Le facteur de qualité Q_L de la bobine donne la mesure de la qualité d'une bobine. Les pertes totales de la bobine se résument en une résistance de pertes série. Le rapport entre la réactance et la résistance de pertes donne la qualité de la bobine. Le facteur de pertes tg δ donne la mesure des pertes dans un condensateur. Toutes les pertes d'un condensateur se résument en une résistance de pertes série. La tangente de l'angle de pertes δ en est l'expression. L'angle de pertes δ est l'angle complémentaire de celui du déphasage.

6. Exercices de répétition (solutions page 457)

a) Quelle est la signification du facteur de puissance cos φ ?
b) Quelle est l'utilité du sinus de l'angle de déphasage ?
c) Expliquez les expressions « Puissance apparente », « Puissance réactive », et « Puissance active ». Nommez les unités qui en donnent la mesure.
d) Qu'est-ce qui est exprimé par la qualité de la bobine Q_L ?
e) Quelle est l'unité de mesure des pertes dans les condensateurs ?
f) La qualité d'une bobine est mesurée à 10 MHz. Pour une inductance de 2 μH, le facteur de qualité est de 80. Quelle est la valeur de la résistance de pertes série ?
g) Un condensateur électrolytique de 32μF, chargé avec une tension continue suffisamment élevée, présente une résistance de pertes série de 5 ohms à 50 Hz. Quelle est la valeur de la tg δ du condensateur ?
h) Calculez l'impédance du circuit de la figure 186, le facteur de puissance, le facteur de la puissance réactive ; les puissances réactive, active et apparente ; l'angle de déphasage. Faites un dessin du diagramme vectoriel.

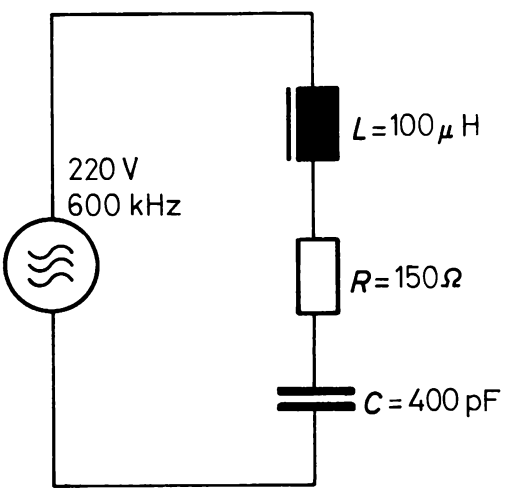


Figure 186

V. La mise en parallèle de résistances et de réactances

1. Introduction

Dans la pratique, les circuits composés de résistances et de réactances en parallèle se rencontrent aussi souvent que les circuits série. Le calcul de réactances et de résistances réelles en parallèle s'effectue de la même façon que pour les résistances en parallèle ; les conductances s'additionnent pour donner la conductance totale. Cependant, cette addition n'est entreprise qu'en tenant compte du déphasage des courants à travers les réactances et les résistances partielles. Ceci conduit à l'addition vectorielle des conductances.

2. Que savez-vous concernant la mise en parallèle de résistances et de réactances ? (solutions page 461)

a) Quelle signification a le cos φ lors de la mise en parallèle de réactances et de résistances réelles, comparé avec le circuit série ?
b) Quelle est la différence fondamentale, lors du traitement par calcul, entre le circuit série et celui en parallèle composé de réactances et de résistances ?
c) Qu'entendez-vous par le terme de « Conductance » ?
d) Quelles notions doivent être connues lors de la mise en parallèle d'un condensateur et d'une résistance de façon à ce que la puissance réactive puisse être estimée ?
e) Est-il possible de déterminer le facteur de qualité Q_L d'une bobine lorsque celle-ci est amortie par une résistance en parallèle ?
f) Sur le plan des nombres de Gauss (plan imaginaire), comment le sens des conductances se comporte-t-il par rapport aux résistances correspondantes ?

3. La mise en parallèle de résistances et de réactances

a. Circuit parallèle composé de résistances inductives (réactances) et de résistances ohmiques

Le comportement en travail du circuit en parallèle est démontré au moyen de l'expérience suivante. Le schéma de l'essai est représenté par la figure 187 alors que la figure 188 en indique le montage. Tout d'abord, seule la bobine est reliée au réseau, le courant est mesuré. La même mesure est ensuite effectuée avec la résistance seule. Pour la mesure suivante, la bobine et la résistance sont reliées en parallèle. *Le courant mesuré est plus petit que la somme algébrique des courants mesurés à travers la bobine et la résistance.*

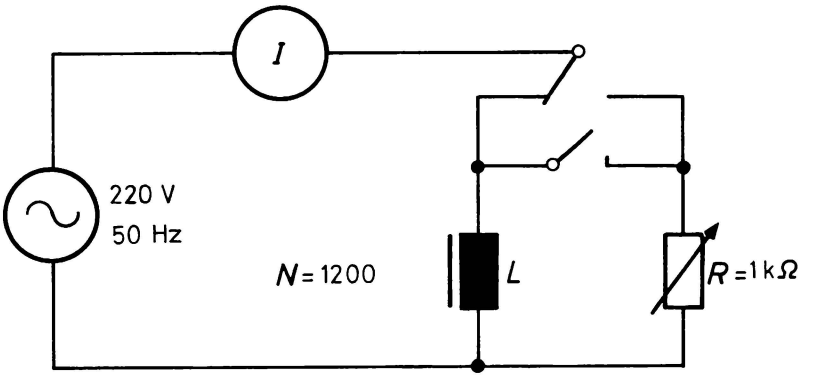


Figure 187

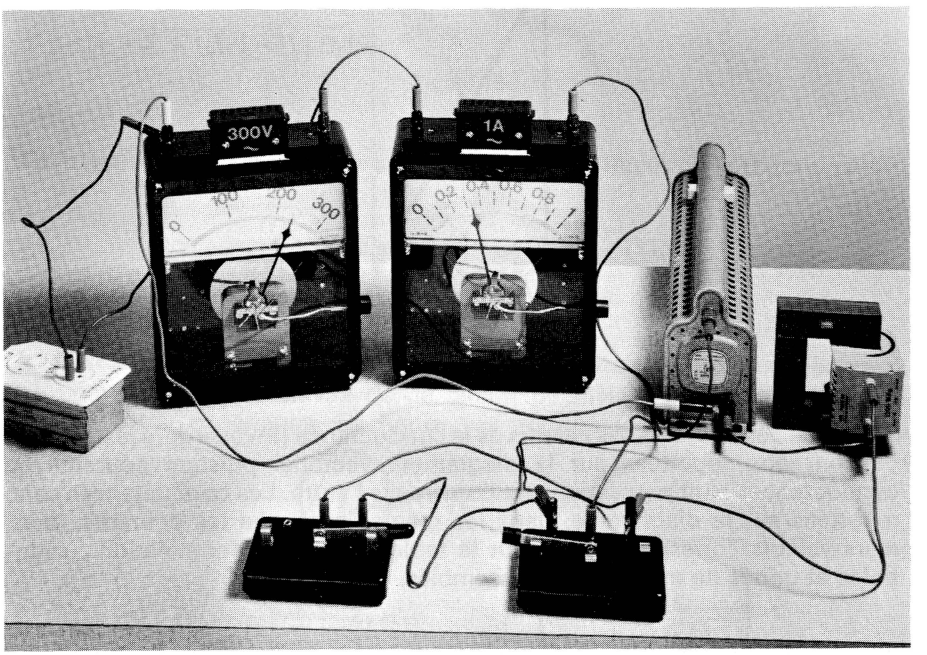


Figure 188

Cela signifie que la résistance équivalente du circuit parallèle composé d'une résistance et d'une réactance est plus grande que la résistance équivalente d'un circuit semblable composé de deux résistances réelles. La cause de ce phénomène réside dans le déphasage entre le courant dans la bobine et celui dans la résistance.

Dans le circuit en parallèle, la même tension est appliquée aux deux composants (bobine et résistance). Les courants à travers ceux-ci sont divers et se rapportent à leur valeur et à leur phase. Le courant équivalent peut se déterminer graphiquement au moyen d'un diagramme vectoriel ; par le calcul, il s'obtient en additionnant géométriquement les deux courants. Le courant à travers la résistance réelle est reporté sur l'axe réel positif, celui qui traverse l'inductance est reporté sur l'axe imaginaire négatif car, là, le courant dans la bobine retarde de 90° sur celui qui traverse la résistance réelle. La figure 189 montre le procédé graphique permettant de déterminer le courant équivalent.

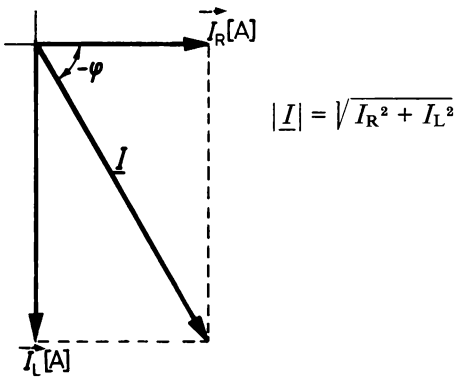


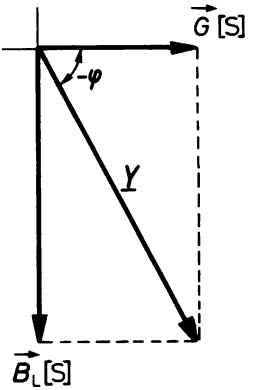
Figure 189

A la place des courants, les valeurs de la conductance (inverse de la résistance) peuvent être reportées sur le diagramme vectoriel puisque courants et conductances sont proportionnels l'un envers l'autre. Les conductances sont reportées sur le diagramme, dans les mêmes sens que les courants, avec leurs valeurs correspondantes. Sur le tableau 15, les dénominations, symboles et unités de mesure sont rassemblés.

Dénomination	Symbole	Unité de mesure
Conductance efficace ou réelle	G	Siemens (S)
Susceptance	B_L ou B_C	Siemens (S)
Admittance (ou conductance apparente)	Y	Siemens (S)

Tableau 15

La figure 190 montre le diagramme vectoriel d'une inductance et d'une résistance en parallèle.



$$|\underline{Y}| = \sqrt{(\frac{1}{R})^2 + (\frac{1}{\omega L})^2}$$

$$|\underline{Y}| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

Figure 190

Le *facteur de puissance* cos φ se calcule selon les règles de la trigonométrie :

$$\cos \varphi = \frac{G}{|\underline{Y}|} \text{ ou } \cos \varphi = \frac{|\underline{Z}|}{R} \qquad \left(G = \frac{1}{R} \; ; \; |\underline{Y}| = \frac{1}{|\underline{Z}|}\right)$$

b. Circuit parallèle composé d'une capacitance et d'une résistance

Le comportement en travail de ce circuit parallèle doit être démontré au moyen d'une expérience. La figure 191 montre le schéma de cet essai.

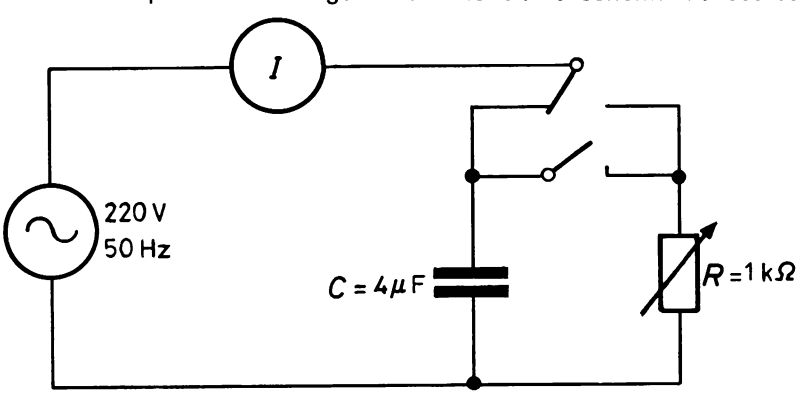


Figure 191

La figure 192 indique le montage de l'expérience.

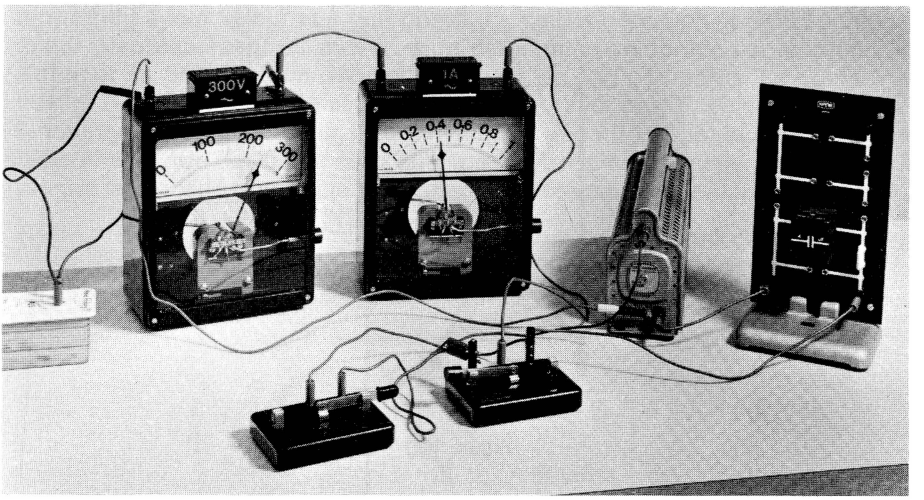


Figure 192

La marche à suivre est la même que pour l'essai précédent. Les courants sont mesurés séparément à travers C et R. Le courant équivalent est à nouveau plus petit que la somme des deux courants partiels. Le circuit se comporte de manière analogue à celui composé d'une bobine et d'une résistance. La résolution graphique et mathématique du problème s'opère selon les mêmes règles. Il faut toutefois remarquer que le courant à travers le condensateur avance de 90° par rapport à celui qui traverse la résistance. La figure 193 montre le diagramme vectoriel des courants.

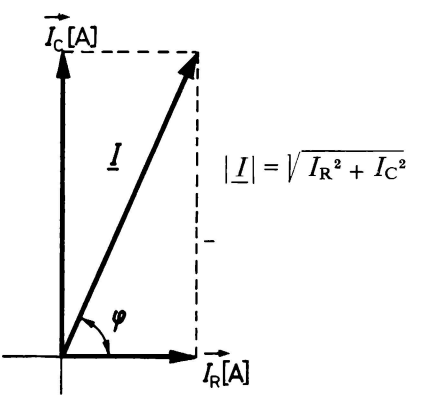
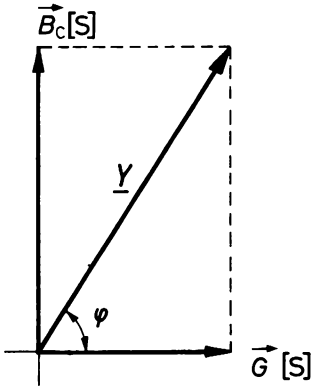


Figure 193

Sur la figure 194, les valeurs des conductances sont représentées en un diagramme vectoriel.



$$|\underline{Y}| = \sqrt{G^2 + (\omega C^2)}$$

$$|\underline{Y}| = \sqrt{G^2 + B_C{}^2}$$

Figure 194

Le facteur de puissance cos φ peut se déterminer d'après le diagramme vectoriel.

$$\cos \varphi = \frac{G}{|\underline{Y}|}$$

c. Circuit parallèle composé d'une inductance, d'une capacitance et d'une résistance

L'essai, selon la figure 195, nous montre le comportement d'un circuit parallèle composé d'un condensateur, d'une bobine et d'une résistance.

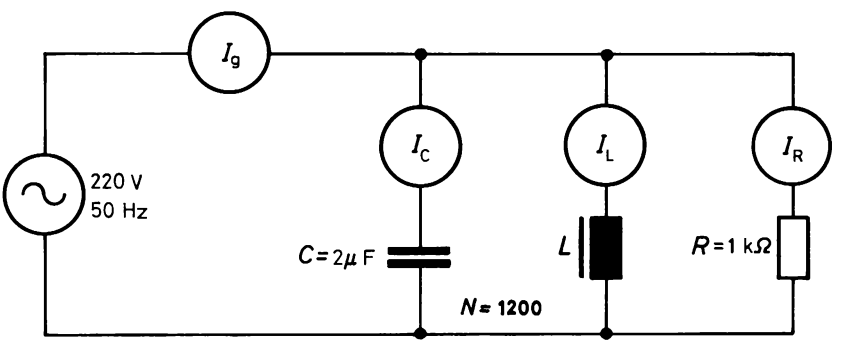


Figure 195

Le montage de l'essai est représenté par la figure 196.

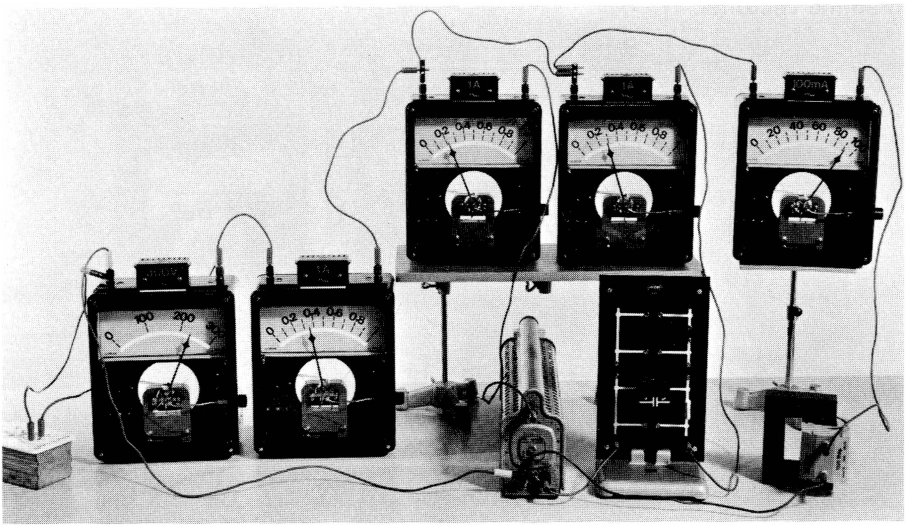
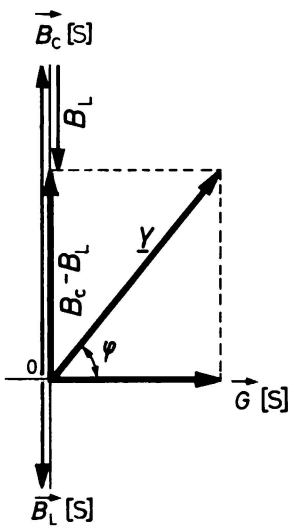


Figure 196

L'essai prouve que le courant total est notablement plus petit que la somme des courants partiels. Le résultat de l'expérience est compréhensible si l'on pense que les deux courants réactifs I_L et I_C sont déphasés de 180° l'un par rapport à l'autre. Considéré sous l'angle vectoriel cela signifie qu'ils agissent l'un contre l'autre ; seule la différence des deux courants est active.



$$|\underline{Y}| = \sqrt{G^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}$$

$$|\underline{Y}| = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{B}{G}$$

Figure 197

Ce courant réactif résultant est additionné géométriquement et donne le courant total. Selon que l'un des courants réactifs domine, le circuit se comporte comme un circuit *RC* ou *RL*. Un cas particulier se présente lorsque les deux courants réactifs sont de valeurs égales et le circuit se comporte comme une résistance ohmique. La figure 197 montre la valeur de la conductance totale, déterminée de façon vectorielle, du circuit dont nous venons de parler. Dans ce cas, la susceptance capacitive domine pour la fréquence considérée et le circuit agit comme un circuit *RC*.

4. Exemples

a. Calcul d'un circuit parallèle composé d'une inductance et d'une résistance ohmique

Calculer le circuit de la figure 198. Les calculs doivent être vérifiés à l'aide du diagramme vectoriel.

On cherche:
Z, I_g, I_L, P, P_s, P_q,
cos φ, sin φ, l'angle φ

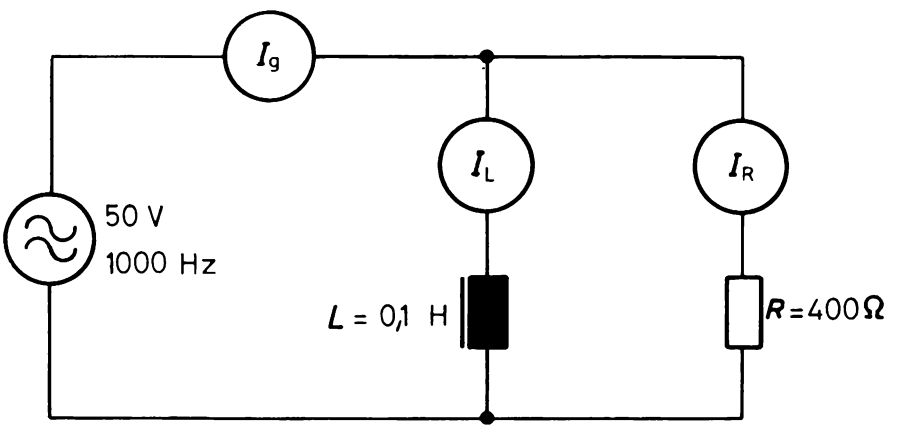


Figure 198

Marche à suivre:

Première étape : calcul des conductances $G = \frac{1}{R}$

– sous la forme de composantes $B_L = \frac{1}{j\omega L} = \frac{1}{jX_L} = -j\frac{1}{X_L}$

– écrire les formules $B_L \equiv |B_L| = \frac{1}{X_L}$

– introduire les valeurs et calculer

$$G = \frac{1}{400}$$

$$= 2{,}5 \text{ mS}$$

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 0{,}1} \quad \frac{\text{s A}}{\text{V s}}$$

$$B_L = 1{,}592 \text{ mS}$$

Deuxième étape : calcul de l'admittance

– écrire la formule de base

$$|\underline{Y}| = \sqrt{G^2 + B_L{}^2}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$Y \equiv |\underline{Y}| = \sqrt{(2{,}5 \cdot 10^{-3})^2 + (1{,}592 \cdot 10^{-3})^2}$$

$$Y = 2{,}96 \text{ mS}$$

Troisième étape : calcul de Z

$$Z = \frac{1}{Y}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$Z = \frac{1}{2{,}96 \cdot 10^{-3}}$$

$$Z = \mathbf{338}\ \Omega$$

Quatrième étape : calcul des courants

– écrire la formule de base

$$I_g = \frac{U}{Z}$$

$$I_L = U \cdot B_L$$

$$I_R = U \cdot G$$

– introduire les valeurs et calculer

$$I_g = \frac{50}{338}$$

$$I_g = \mathbf{0{,}148\ A}$$

$$I_L = U \cdot B_L$$

$$= 50 \cdot 1{,}592 \cdot 10^{-3}$$

$$I_L = \mathbf{79{,}6\ mA}$$

$$I_R = U \cdot G$$

$$= 50 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3}$$

$$I_R = \mathbf{125\ mA}$$

Cinquième étape : calcul de sin φ, cos φ, et angle φ

– écrire les formules de base

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}; \qquad \sin \varphi = \frac{Z}{X_L} = Z \cdot B_L$$

– introduire les valeurs et calculer

$$\cos \varphi = \frac{338}{400}; \qquad \sin \varphi = 338 \cdot 1{,}592 \cdot 10^{-3}$$

$$\cos \varphi = \mathbf{0{,}845}; \qquad \sin \varphi = \mathbf{0{,}538}$$

$\sin \varphi = 0{,}538$

– lire l'angle correspondant dans les tables $\varphi = \mathbf{32{,}5°}$

Sixième étape : calcul des puissances

– écrire la formule de base $P_S = U \cdot I$

– introduire les valeurs et calculer

		Contrôles:
P_S	$= 50 \cdot 0{,}148$	
P_S	$= \mathbf{7{,}4\ VA}$	
P	$= P_S \cdot \cos \varphi$	$P = U \cdot I$
P	$= 7{,}4 \cdot 0{,}845$	$P = 50 \cdot 0{,}125$
P	$= \mathbf{6{,}25\ W}$	$P = 6{,}25$ W
P_q	$= P_S \cdot \sin \varphi$	$P_q = U \cdot I_L$
P_q	$= 7{,}4 \cdot 0{,}538$	$P_q = 50 \cdot 0{,}796$
P_q	$= \mathbf{3{,}98\ vars}$	$P_q = 3{,}98$ vars

Septième étape : vérification des résultats avec le diagramme vectoriel
Sur la figure 199, la susceptance et la conductance efficace sont reportées. La conductance totale est déterminée graphiquement et comparée avec la valeur calculée. L'angle de déphasage φ est mesuré avec le rapporteur puis comparé avec la valeur calculée ci-dessus.

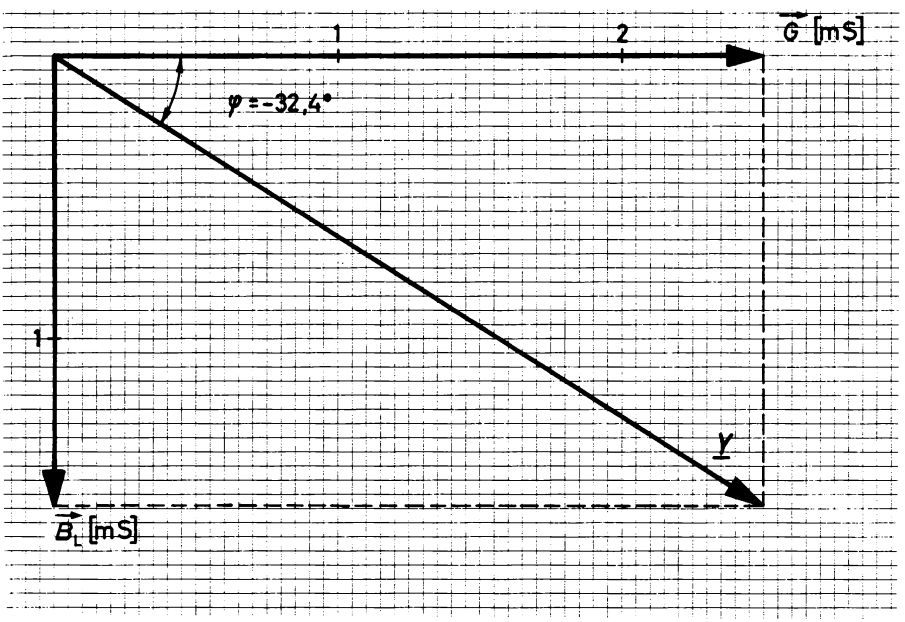


Figure 199

b. Calcul d'un circuit parallèle comprenant une capacité et une résistance ohmique

Calculer le schéma de la figure 200. Vérifier les calculs à l'aide du diagramme vectoriel.

On demande:
Z, I_g, I_C, I_R, cos φ, sin φ, $\sphericalangle \varphi$, P, P_S, P_q

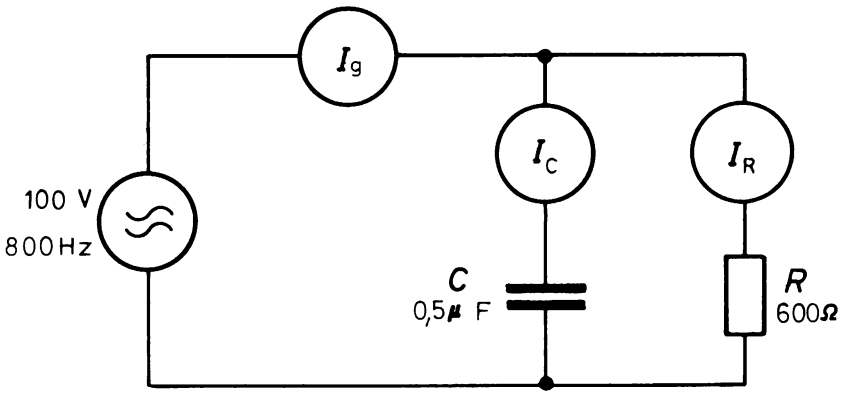


Figure 200

Marche à suivre:
Première étape: calcul de la conductance

– écrire la formule de base $G = \dfrac{1}{R}$

– introduire les valeurs et calculer $G = \dfrac{1}{600}$

$G = 1{,}667$ mS

– sous la forme de composantes $B_C = j\omega C$

$B_C = |B_C| = \omega C; \quad [B_C] = \dfrac{As}{s \cdot V} = S$

$B_C = 2\pi \cdot 0{,}8 \cdot 10^3 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}$

$B_C = 2{,}513$ mS

Deuxième étape: calcul de l'admittance

– écrire la formule de base $|\underline{Y}| = \sqrt{G^2 + B^2}$

– introduire les valeurs et calculer $Y = |\underline{Y}| = \sqrt{1{,}667^2 \cdot 10^{-6} + 2{,}513^2 \cdot 10^{-6}}$

$Y = 3{,}015$ mS

Troisième étape : calcul de l'impédance Z

– écrire la formule de base $Z = \frac{1}{Y}$

– introduire les valeurs et calculer $Z = \frac{1}{3{,}015 \cdot 10^{-3}}$

$Z = \mathbf{332\ \Omega}$

Quatrième étape : calcul des courants

– écrire la formule de base $I_g = \frac{U}{Z}$

– introduire les valeurs et calculer $I_g = \frac{100}{332}$

$I_g = \mathbf{0{,}3015\ A}$

$I_R = \frac{U}{R}$

$I_R = \frac{100}{600}$

$I_R = \mathbf{0{,}1667\ A}$

$I_C = U \cdot B_C$

$I_C = 100 \cdot 2{,}513 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{V As}}{\text{sV}}$

$I_C = \mathbf{0{,}2513\ A}$

Cinquième étape : calcul de cos φ, sin φ et angle φ

– écrire la formule de base $\cos \varphi = \frac{Z}{R}$

– introduire les valeurs et calculer $\cos \varphi = \frac{332}{600}$

$\cos \varphi = \mathbf{0{,}553}$

$\sin \varphi = Z \cdot B_C$

$\sin \varphi = 332 \cdot 2{,}513 \cdot 10^{-3}$

$\sin \varphi = \mathbf{0{,}834}$

– l'angle φ est lu dans les tables $\varphi = \mathbf{56{,}44°}$

Sixième étape : calcul des puissances

– écrire la formule de base $P_S = U \cdot I_g$

– introduire les valeurs et calculer

$P_S = 100 \cdot 0{,}315$		
$P_S =$ **30,15 VA**	*Contrôles:*	
$P = P_S \cdot \cos \varphi$	$P = U \cdot I_R$	
$P = 30{,}15 \cdot 0{,}55$	$P = 100 \cdot 0{,}1667$	
$P =$ **16,67 W**	$P = 16{,}67$ W	
$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$	$P_q = U \cdot I_C$	
$P_q = 30{,}15 \cdot 0{,}834$	$P_q = 100 \cdot 0{,}2513$	
$P_q =$ **25,13 vars**	$P_q = 25{,}13$ vars	

Septième étape : vérification des résultats avec le diagramme vectoriel
La susceptance et la conductance efficace sont reportées sur la figure 201. La conductance totale est estimée graphiquement et comparée avec la valeur calculée.

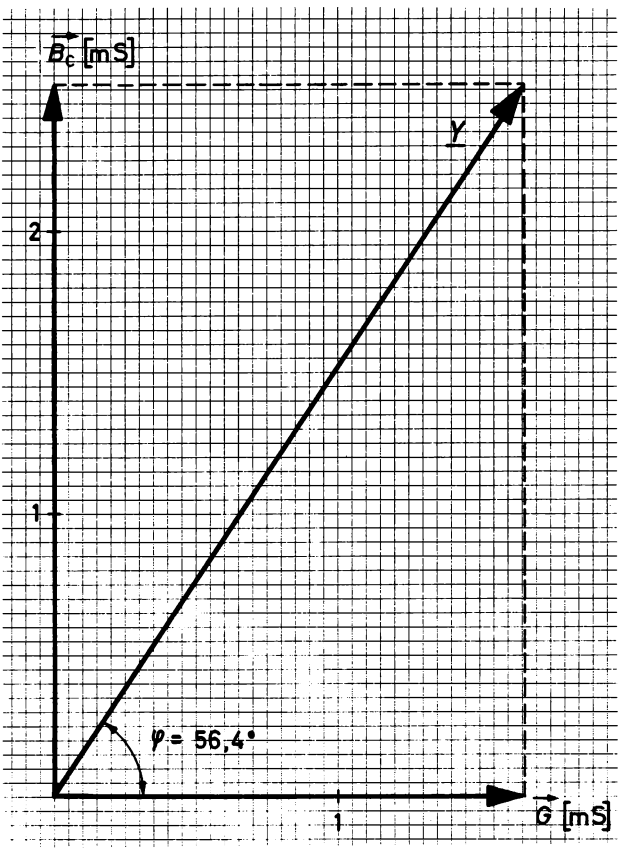


Figure 201

L'angle de déphasage φ est mesuré avec le rapporteur et comparé avec la valeur calculée ci-dessus.

c. Calcul d'un circuit parallèle comprenant une capacité, une inductance et une résistance ohmique

Calculer le schéma de la figure 202. Les calculs doivent être vérifiés au moyen du diagramme vectoriel.

On demande: Z, I_g, I_L, I_C, I_R, cos φ, sin φ, $\sphericalangle \varphi$, P_S, P, P_q

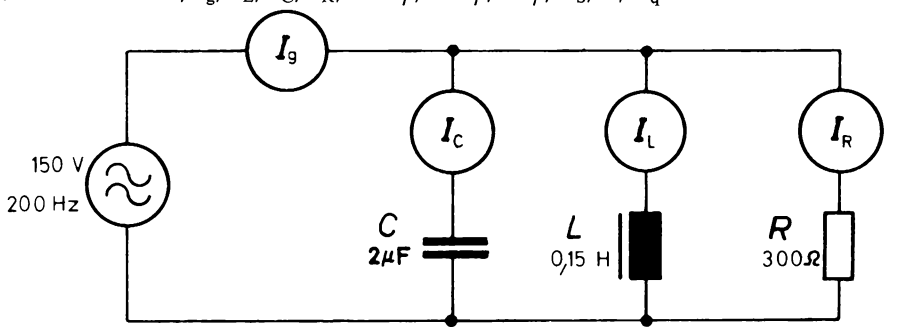


Figure 202

Marche à suivre:

Première étape: calcul de la conductance

– écrire la formule de base $G = \frac{1}{R}$

– introduire les valeurs et calculer $G = \frac{1}{300}$

$= 3{,}33 \text{ mS}$

– sous la forme de composantes $B_C = j\omega C$; $B_L = j \cdot \frac{1}{\omega L}$

$B_C \equiv |B_C| = \omega C$

$B_C = 2\pi \cdot 0{,}2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \quad \frac{As}{s \cdot V}$

$B_C = 2{,}513 \text{ mS}$

$B_L \equiv |B_L| = \frac{1}{\omega L}$

$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 0{,}2 \cdot 10 \cdot 0{,}15} \quad \frac{s \cdot A}{Vs}$

$B_L = 5{,}31 \text{ mS}$

Deuxième étape: calcul de l'admittance

– écrire la formule de base $|\underline{Y}| = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$

– introduire les valeurs et calculer $Y \equiv |\underline{Y}| = \sqrt{3{,}33^2 \cdot 10^{-6} + 2{,}28^2 \cdot 10^{-6}}$

$Y = 4{,}35 \text{ mS}$

Troisième étape : calcul de l'impédance

– écrire la formule de base $Z = \frac{1}{Y}$

– introduire les valeurs et calculer $Z = \frac{1}{4{,}35 \cdot 10^{-3}}$

$Z = \mathbf{230\ \Omega}$

Quatrième étape : calcul des courants

– écrire la formule de base $I_g = \frac{U}{Z}$

– introduire les valeurs et calculer $I_g = \frac{150}{230}$

$I_g = \mathbf{0{,}652\ A}$

$I_R = \frac{U}{R}$

$I_R = \frac{150}{300}$

$I_R = \mathbf{0{,}5\ A}$

$I_L = U \cdot B_L$

$I_L = 150 \cdot 5{,}31 \cdot 10^{-3}\ \ V \cdot \frac{As}{Vs}$

$I_L = \mathbf{0{,}796\ A}$

$I_C = U \cdot B_C$

$I_C = 150 \cdot 2{,}51 \cdot 10^{-3}\ \ V \cdot \frac{As}{Vs}$

$I_C = \mathbf{0{,}376\ A}$

Cinquième étape : calcul de sin φ, cos φ, et $\sphericalangle\ \varphi$

– écrire les formules de base $\cos \varphi = \frac{Z}{R}$

$\cos \varphi = \frac{230}{300}$

$\cos \varphi = \mathbf{0{,}767}$

$\sin \varphi = \frac{B_L - B_C}{Y} = B \cdot Z$

$\sin \varphi = 2{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 230$

$\sin \varphi = \mathbf{0{,}643}$

– lire l'angle de déphasage dans les tables

$\varphi = \mathbf{-40°}$

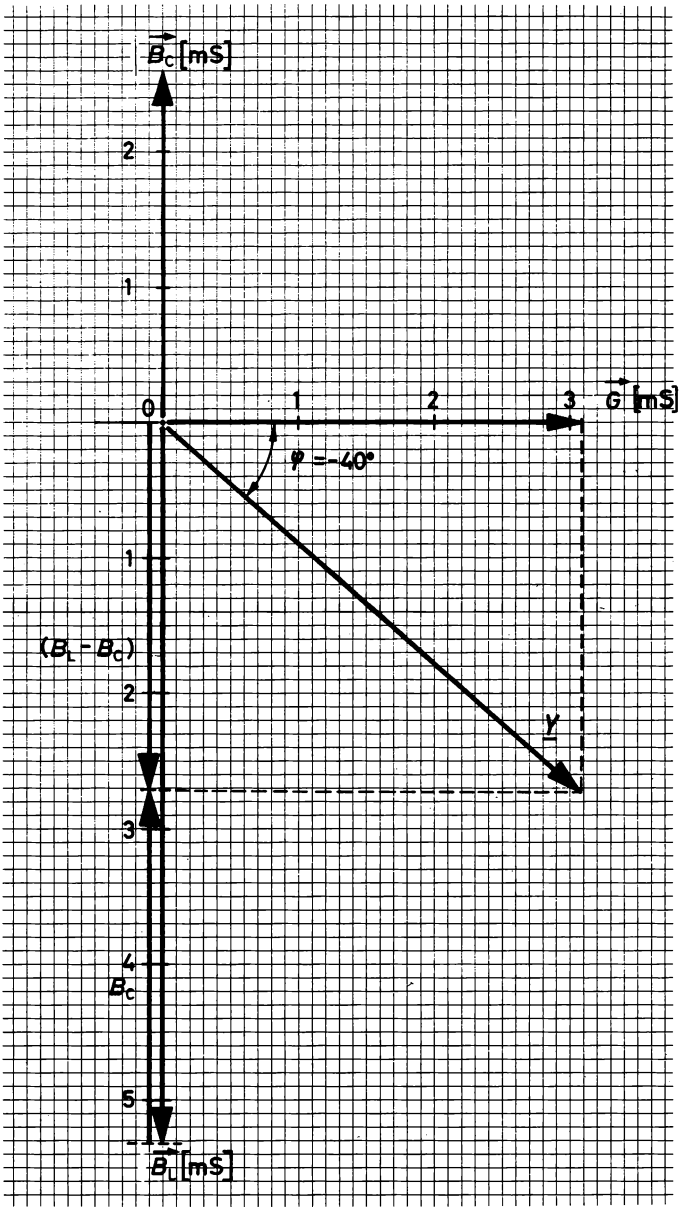


Figure 203

Sixième étape : calcul des puissances

– écrire les formules de base $P_S = U \cdot I_g$

– introduire les valeurs et calculer

	Contrôles:
$P_S = 150 \cdot 652$	
$P_S = \mathbf{97{,}8\ VA}$	
$P = P_S \cdot \cos \varphi$	$P = U \cdot I_R$
$P = 97{,}8 \cdot 0{,}767$	$P = 150 \cdot 0{,}5$
$P_q = \mathbf{75\ W}$	$P = 75$ W
$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$	$P_q = U \cdot (I_L - I_C)$
$P_q = 97{,}8 \cdot 0{,}643$	$P_q = 150 \cdot 0{,}42$
$P_q = \mathbf{62{,}8\ vars}$	$P_q = 63$ vars

– Les petites différences entre les résultats proviennent de l'imprécision relative de la règle à calcul. Cette imprécision est tolérable car même si le calcul était plus exact sa précision serait encore supérieure à celle des composants employés en électronique dont la tolérance de fabrication est de 5% en général et de 1% dans les appareils de mesure. De plus, la précision de lecture des bons instruments se situe entre 1% et 2%.

Septième étape : vérification des résultats avec le diagramme vectoriel
Les susceptances et les conductances réelles sont reportées sur le diagramme vectoriel de la figure 203. L'estimation graphique de la conductance totale résulte de la différence entre la susceptance et la conductance réelle. Sa valeur est comparée avec le résultat du calcul. L'angle de déphasage φ est mesuré avec le rapporteur puis comparé avec celui trouvé par calcul.

5. L'essentiel

Les courants qui traversent les divers embranchements d'un circuit parallèle déterminent le comportement de ce circuit. Pour tous les composants du circuit la tension a la même valeur et la même phase.
Sur le diagramme vectoriel, le circuit parallèle est représenté par les conductances.
Le sens des vecteurs des conductances, dans le diagramme vectoriel, est déterminé par le sens des courants correspondants.
Pour calculer un circuit parallèle il est avantageux de calculer tout d'abord les conductances et de les dessiner sur un diagramme vectoriel.
L'estimation de la conductance totale et du déphasage s'effectue ensuite, sur le diagramme, selon les règles de la trigonométrie. La solution graphique du problème permet une vérification simple et immédiate des calculs.
Observer les simples règles suivantes lors de la résolution graphique de chaque circuit parallèle composé :

– les conductances ohmiques sont reportées sur l'axe positif.

– les conductances capacitives sont reportées sur l'axe imaginaire positif.

– Les conductances inductives sont reportées sur l'axe imaginaire négatif.
– Dans les circuits, comportant des conductances inductives et capacitives, on effectue la différence entre les conductances. Le sens de la différence des conductances détermine si le circuit est inductif ou capacitif.

6. Exercices de répétition (solutions page 463)

a) Comment le sens d'un vecteur de la conductance réactive d'un circuit parallèle est-il déterminé ?
b) Existe-t-il une différence entre le facteur de puissance cos φ d'un circuit série et celui d'un circuit parallèle ?
c) Définissez l'expression « conductance inductive ».
d) Définissez l'expression « conductance capacitive ».
e) Une inductance de 6 H est reliée en parallèle avec une résistance de 900 ohms. Calculez l'impédance Z et le facteur de puissance pour une fréquence de 50 Hz. Vérifiez le résultat des calculs par le diagramme vectoriel.
f) Au circuit de l'exercice e on ajoute un condensateur en parallèle. Quelle doit être sa capacité pour compenser la composante réactive et que le circuit se comporte comme une résistance ohmique ?
Vérifiez le résultat des calculs par le diagramme vectoriel.
g) Calculez le circuit de la figure 204 et vérifiez les calculs à l'aide du diagramme vectoriel.
On demande:
Z, P_S, P, P_q, cos φ, sin φ, $\sphericalangle \varphi$

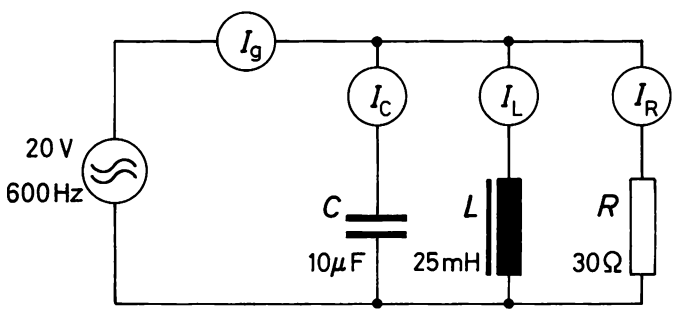


Figure 204

VI. Le transformateur

1. Introduction

Il n'est plus possible de faire abstraction du transformateur en électrotechnique et en électronique. La technique du courant fort utilise de grands transformateurs dans les centrales électriques et, dans les appareils électriques, les tensions d'alimentation nécessaires sont fournies par des transformateurs de réseau. Dans les appareils basse fréquence, les transformateurs sont utilisés pour la transmission des sons. Le transformateur est un composant si important qu'il est utilisé dans la plupart des circuits et des appareils. Nous le rencontrons principalement dans les appareils d'alimentation et dans les circuits basse fréquence. Son rôle est de transmettre et de transformer le courant électrique alternatif ou des impulsions de puissance.

2. Que savez-vous concernant le transformateur ?
(solutions page 469)

a) De quels éléments un transformateur pour tension de basse fréquence est-il constitué ?
b) Quel est le rôle des transformateurs de réseau ?
c) Quelle est la grandeur qui détermine le rapport de transformation entre la tension primaire et la tension secondaire ?
d) Pourquoi le noyau de fer d'un transformateur est-il feuilleté ?
e) Quel est le rôle du noyau de fer ?
f) Existe-t-il des transformateurs sans noyau de fer ?

3. Le transformateur

a. Le facteur de couplage k

Le *facteur de couplage k* est une mesure indiquant le degré de couplage des bobines. La figure 205 montre des bobines couplées, en coupe.

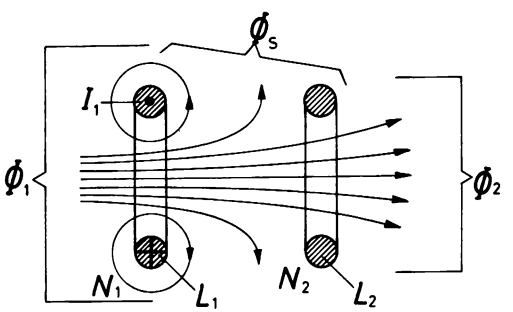


Figure 205

Lorsque la bobine primaire L_1 est parcourue par un courant alternatif, il se produit alors un champ magnétique alternatif. Le flux total de ce champ est désigné par Φ_1. Une partie du flux primaire Φ_1 coupe les spires de la bobine secondaire L_2. Cette partie du flux est désignée par Φ_2. Une partie du flux primaire n'influence pas le bobinage secondaire, pour ce dernier il est donc perdu. Ce *flux de dispersion* est désigné par Φ_S.
Le facteur de couplage de la bobine L_1 avec la bobine L_2 indique si le couplage est serré ou lâche entre les deux bobines. Il s'exprime par le rapport entre le flux qui coupe le bobinage secondaire et le flux total du primaire.

$$k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$$

La lettre k exprime le symbole du facteur de couplage (ou coefficient). Le facteur de couplage qui est sans dimension varie entre 0 (couplage nul) et 1 (couplage maximal).
Si un courant alternatif est envoyé dans la bobine L_2, une partie du flux Φ_2 influence la bobine L_1 et le facteur de couplage entre L_2 et L_1 s'exprime par le rapport Φ_1/Φ_2.

b. Le coefficient de dispersion σ

Ce coefficient σ donne une mesure de la dispersion qui se produit entre deux bobines couplées. Le coefficient de dispersion de la bobine L_1 par rapport à la bobine L_2 s'exprime par le rapport entre le flux de dispersion et le flux primaire total.

$$\sigma = \frac{\Phi_S}{\Phi^1}$$

Son symbole est la lettre grecque minuscule sigma (σ).
Le coefficient de dispersion est un nombre sans dimension qui est égal à zéro dans le cas le plus favorable, c'est-à-dire pour un couplage maximal des bobines.
Le coefficient de dispersion entre les bobines L_2 et L_1 s'exprime par le rapport entre le flux de dispersion et le flux dans L_2.

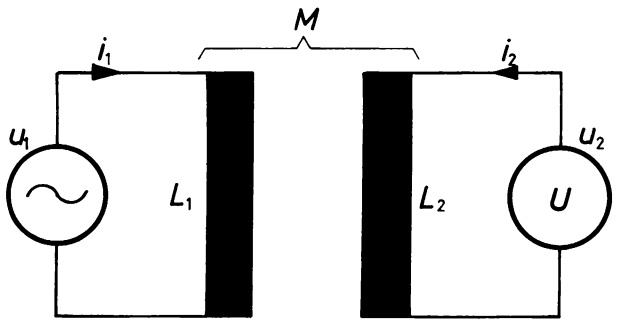
c. L'induction mutuelle M

L'induction mutuelle M est une mesure de l'influence entre deux bobines couplées par la partie commune du champ magnétique.
L'induction mutuelle est le résultat du produit du nombre de spires par la conductibilité de la partie commune du champ magnétique.

$$M = \frac{\Phi_2}{i_1} \cdot N_2;\ [M] = \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = \text{H}\ (\mu\text{r} = \text{constante})$$

On utilise la lettre M comme symbole.
L'unité de mesure est le henry ou le voltseconde par ampère.

La figure 206 indique la relation qui existe entre l'induction mutuelle et la tension induite.



$$u_2 = M \cdot \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \qquad [u_2] = \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{s}} = \text{V}$$

Figure 206

Une variation de champ produite par une variation de courant dans la bobine L_1 donne naissance à une tension d'induction inverse dans la bobine L_2. La grandeur de cette tension induite dépend de la variation de champ et de l'inductance mutuelle.
Nous nous souvenons que la tension de self-induction, dans une bobine, est déterminée par la variation de courant par unité de temps et par son inductance.

$$u = \frac{\Delta i}{\Delta t} \cdot L\,;\ [u] = \frac{\text{A}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = \text{V}$$

L'équation de la figure 206 laisse apparaître que lors de l'utilisation d'une grande induction mutuelle, la tension induite dans la bobine L_2 augmente. Lorsque le coefficient de couplage est maintenu aussi serré que possible, le flux total de la bobine L_1 passe à travers L_2 ($k = 1$) et si le nombre de spires des deux bobines est le même, l'induction mutuelle atteint la valeur de l'induction primaire. Dans ce cas, la tension induite dans la bobine L_2 correspond à la tension dans L_1.

d. Relations entre le coefficient de couplage, l'induction mutuelle et le coefficient de dispersion

Le coefficient de couplage entre la bobine L_1 et la bobine L_2 forme avec le coefficient de couplage entre la bobine L_2 et L_1 le coefficient de couplage total. Ce dernier s'obtient en effectuant la moyenne géométrique des deux coefficients de couplage.

$$k = \sqrt{k_{12} \cdot k_{21}}$$

k = coefficient de couplage total
k_{12} = coefficient de couplage entre la bobine L_1 et la bobine L_2
k_{21} = coefficient de couplage entre la bobine L_2 et la bobine L_1

Le rapport entre le coefficient de dispersion et le coefficient de couplage est :

$$\sigma = 1 - k^2$$

σ = coefficient de dispersion
k = coefficient de couplage total

L'induction mutuelle entre les bobines L_1 et L_2 correspond au produit du coefficient de couplage total par la moyenne géométrique des deux inductances.

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

M = induction mutuelle
k = coefficient de couplage total
L_1 = inductance de la bobine L_1
L_2 = inductance de la bobine L_2

Nous rencontrerons encore souvent les notions de coefficient de couplage, d'induction mutuelle et de dispersion. Il n'est pas question d'apprendre par cœur les formules qui décrivent ces notions. Il est bien plus important de comprendre la signification de ces termes.
Dans les transformateurs, le coefficient de couplage est maintenu aussi élevé que possible de façon à ce que la dispersion soit aussi faible que possible. Dans les transformateurs, la dispersion signifie une diminution du rendement.

e. Définition du transformateur

Le transformateur se compose de deux bobines couplées par induction. Il est utilisé pour transformer des tensions alternatives et des courants alternatifs, pour adapter des impédances et pour produire des impulsions.

f. Symboles utilisés pour les transformateurs

Les symboles les plus utilisés, représentant les transformateurs, sont rassemblés sur la figure 207.

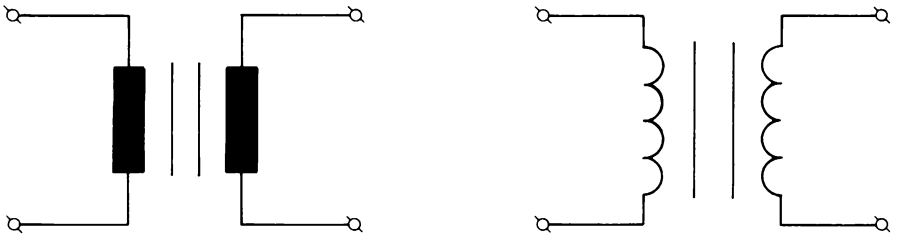


Figure 207a : Transformateur avec noyau de fer

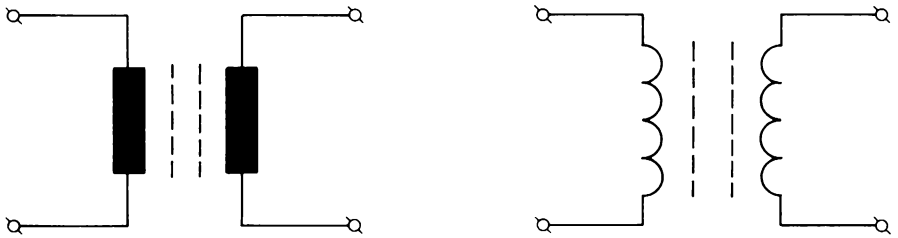


Figure 207b : Transformateur avec noyau de ferrite

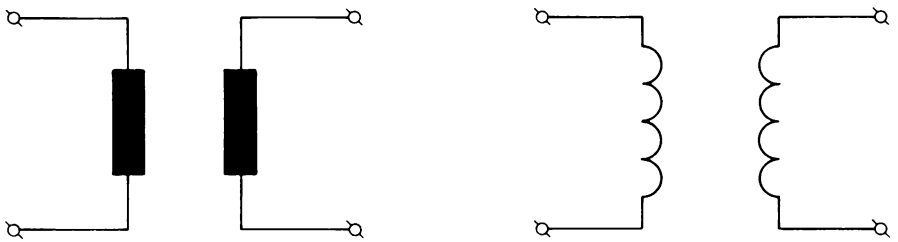


Figure 207c : Transformateur sans noyau magnétique

g. Principe de fonctionnement

La figure 208 donne le schéma permettant de démontrer le fonctionnement de principe d'un transformateur. La figure 209 indique le montage de l'expérience.

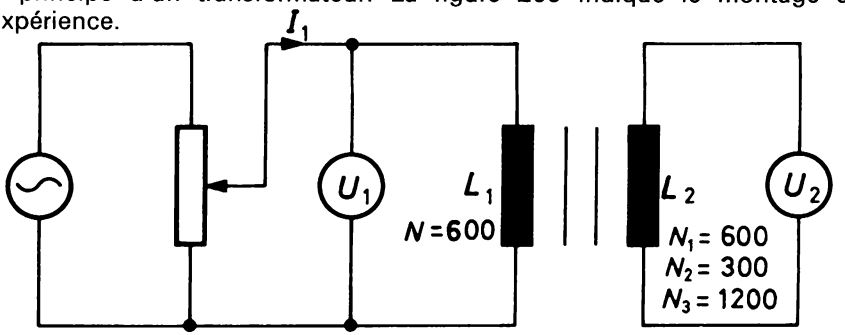


Figure 208

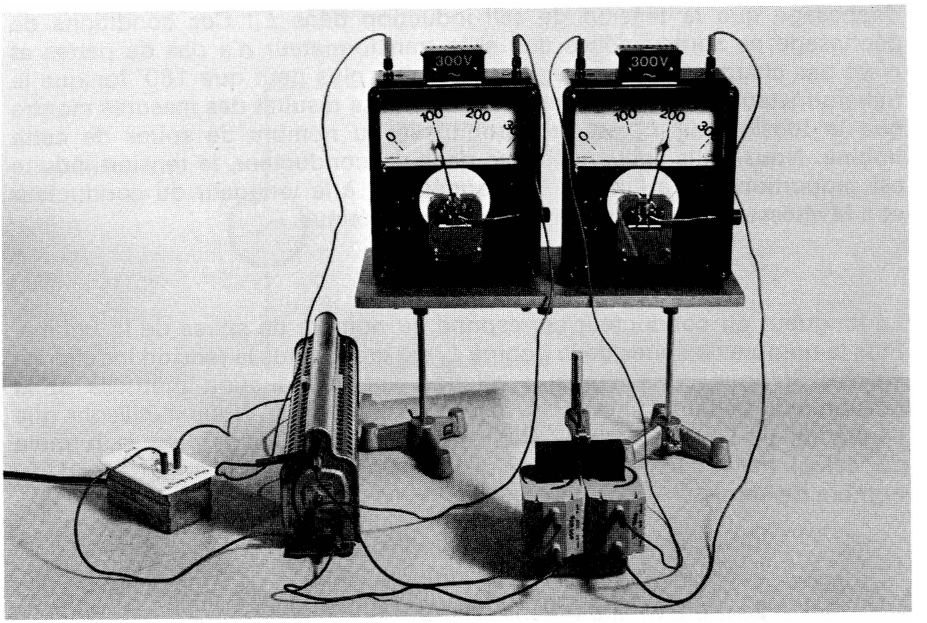


Figure 209

Au moyen du potentiomètre R, la tension sur la bobine L^1 est réglée à zéro au début de l'essai. Les bobines L_1 et L_2 ont chacune 600 spires. Le noyau de fer, fermé, assure un couplage magnétique serré. Le coefficient de couplage est très élevé, sa valeur est voisine de 1. Par conséquent, la valeur de l'induction mutuelle atteint presque celle de l'inductance de la bobine L_1 puisque les deux bobines ont le même nombre de spires.
La tension sur L_1 est augmentée petit à petit et simultanément la tension sur L_2 est observée : les deux tensions sont égales.
Pour effectuer la série de mesures qui suit, la bobine L_2 est échangée. La nouvelle bobine L_2 possède 300 spires. Maintenant, pour chaque mesure, la tension sur L_2 n'est que la moitié de celle sur L_1.
Au cours d'une troisième série de mesures, on utilise une bobine de 1200 spires pour L_2. Maintenant, lors de toutes les mesures, la tension sur L_2 est le double de celle sur L_1.
L'explication des résultats de ces séries de mesures nous reporte à la notion de self-induction. Le courant I_1 donne naissance à un champ magnétique alternatif dans la bobine L_1. Ce champ provoque une tension de self-induction qui agit en sens contraire de la tension d'induction mutuelle. Le même champ induit une tension dans la bobine L_2. Si les enroulements des bobines sont montés dans le même sens, la tension sur L_2 est déphasée de 180° par rapport à celle du réseau car, dans L_2, la tension présente le même

déphasage que la tension de self-induction dans L_1. Ces conditions de déphasage ne sont remplies que si le transformateur n'a pas de pertes et n'est pas chargé. Le déphasage est toujours plus petit que 180° lorsque le transformateur, qui a des pertes, est chargé. Le résultat des mesures montre que la tension sur L_2 est proportionnelle au nombre de spires de cette bobine. Nous nous souvenons que dans un conducteur, la tension induite est proportionnelle à l'induction magnétique, à la longueur du conducteur et à la vitesse de la variation du champ magnétique.

$$U = B \cdot l \cdot v;\ [U] = \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2} \cdot \mathrm{m} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = \mathrm{V}$$

La longueur du conducteur correspond au nombre de spires de la bobine. Plus le nombre de spires de la bobine L_2 est grand, plus la tension induite est élevée. Si nous considérons la relation entre l'induction mutuelle et la tension induite dans L_2 nous arrivons au même résultat. Nous n'utilisons que l'équation de l'induction mutuelle, que nous introduisons dans la formule du calcul de la tension induite, pour constater que celle-ci dépend du nombre de spires.

Induction mutuelle $M = \dfrac{\Delta\Phi_2}{\Delta i_1} \cdot N_2$

Tension induite u dans N_2 $\quad u = M\dfrac{\Delta i_1}{\Delta t}$

il s'ensuit que: $u_2 = \dfrac{\Delta\Phi_2}{\Delta i_1} \cdot N_2 \cdot \dfrac{\Delta i_1}{\Delta t}$

$$= \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t} \cdot N_2;\ [u_2] = \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{s}} = \mathrm{V}$$

Cette équation montre clairement que la valeur de la tension induite dans L_2 est proportionnelle au nombre de spires et à l'inductance mutuelle. La bobine L_1 est désignée par: *bobine primaire* et L_2 par: *bobine secondaire*. Par conséquent, on parle de *tension primaire* U_1 et de *tension secondaire* U_2 Le rapport de N_1 à N_2 s'appelle *rapport de transformation*.

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

Nous résumons:

- Dans un transformateur sans pertes et non chargé, un déphasage de 180° règne entre la tension primaire et la tension secondaire.
- Les tension aux bobinages sont proportionnelles aux nombres de spires.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u}$$

L'expérience suivante apporte la preuve qu'il existe également un déphasage de 180° entre le courant primaire et le courant secondaire. La figure 210 montre le schéma de l'expérience et la figure 211 en donne le montage.

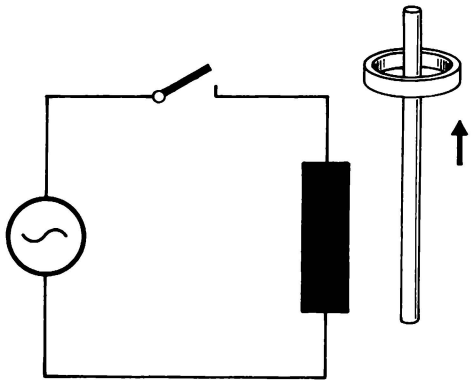


Figure 210

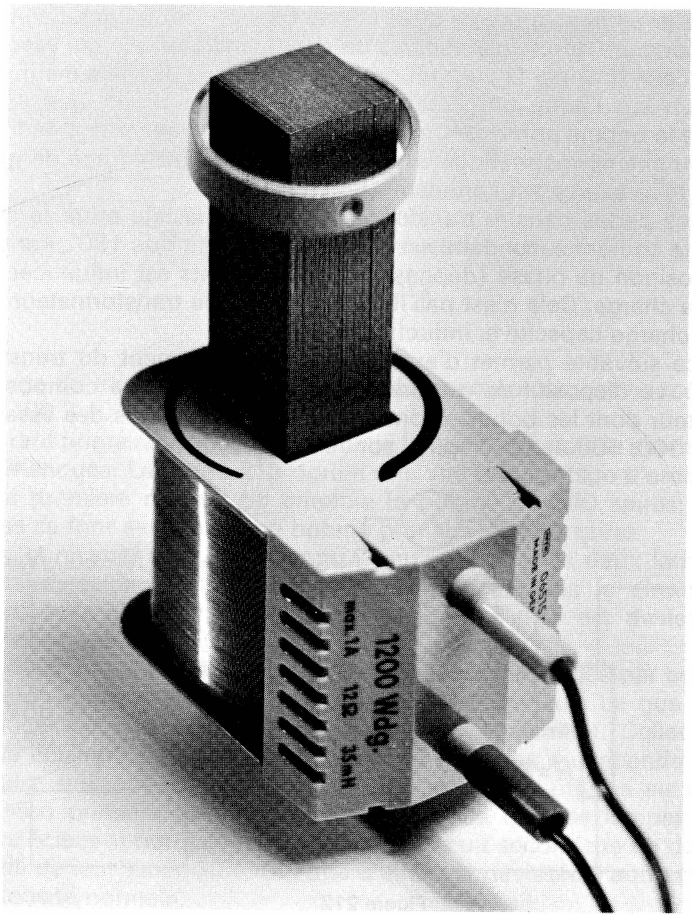


Figure 211

Dès que le circuit de la bobine primaire est fermé (mise sous tension), l'anneau d'aluminium saute vers le haut et y reste en se balançant. Si l'on veut ramener l'anneau vers le bas, une certaine force est nécessaire. Dès qu'on le relâche, il remonte brusquement et reprend sa place antérieure en se balançant. Le comportement de l'anneau s'explique ainsi :
L'anneau agit comme un bobinage secondaire dont la résistance ohmique est extrêmement faible. La résistance inductive (réactance) est notablement plus élevée que la résistance réelle. L'anneau se comporte comme un utilisateur inductif quasi parfait. Le courant, dans l'anneau, retarde de presque 90° sur la tension induite. Le champ magnétique produit par le courant primaire induit une tension dans l'anneau qui est déphasée de 180° par rapport à la tension primaire. Ici, puisque le déphasage entre le courant primaire et la tension primaire est également presque de 90°, un déphasage avoisinant 180° existe entre le courant primaire et le courant secondaire. Dans l'anneau, le courant secondaire donne naissance à un champ magnétique qui est de sens contraire à celui créé par le courant primaire. Les deux champs magnétiques exercent l'un sur l'autre une force de répulsion. Il s'ensuit que l'anneau s'éloigne de la bobine primaire. Dans sa position de balancement, la force de répulsion du champ magnétique est contrebalancée par la force de gravitation que la terre exerce sur l'anneau.
Par suite des pertes dans le transformateur, le déphasage entre le courant primaire et le courant secondaire est toujours plus petit que 180°. Par conséquent, la position de phase (déphasage) des courants est influencée par la nature de la charge. Cela n'est pas indifférent, pour le transformateur s'il est relié à une charge capacitive, inductive ou réelle.
L'expérience suivante permet d'examiner le comportement du transformateur chargé. Le dispositif de mesure, selon la figure 212 se compose d'un transformateur dont les bobines sont interchangeables. Lors des essais, des bobines de 300, 600 et 1200 spires sont utilisées.

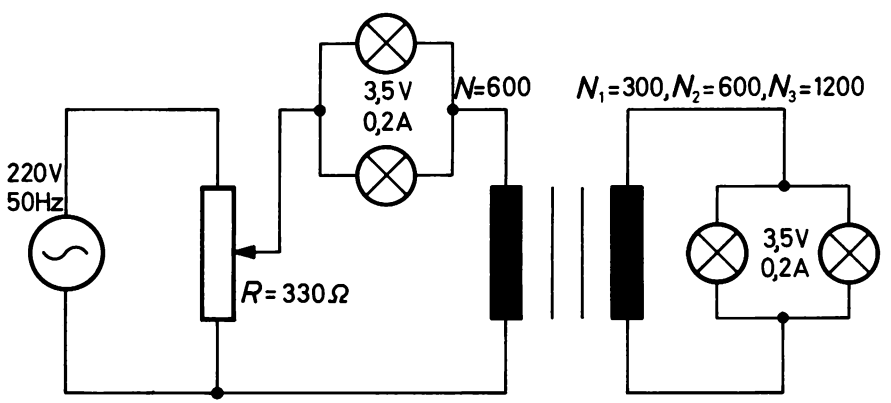


Figure 212

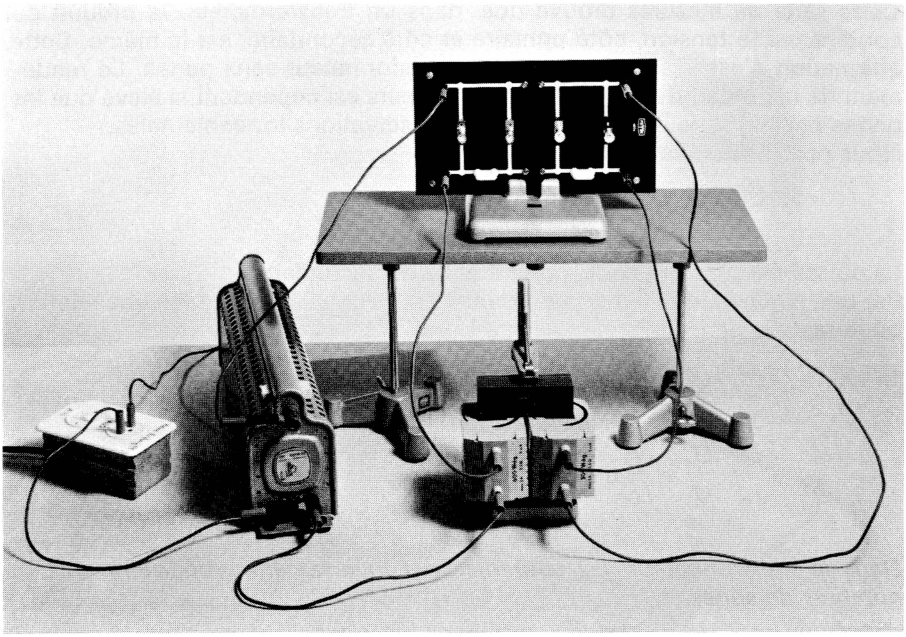


Figure 213

La charge du transformateur est effectuée par deux lampes à incandescence de 3,5 V/0,2 A.
Le courant primaire est indiqué par deux lampes en parallèle ayant les mêmes caractéristiques. La figure 213 donne une vue du montage d'essai.
Pour la première mesure on emploie la bobine de 300 spires. Toutes les mesures se font avec la même bobine primaire de 600 spires.
La tension primaire est augmentée jusqu'à ce que les deux lampes, sur le secondaire, éclairent normalement. Les lampes, dans le circuit primaire, éclairent avec une demi-luminosité ; si l'une d'elles est devissée, l'autre éclaire avec une intensité normale.
Pour l'essai suivant la bobine de 300 spires est remplacée par celle de 600. La tension primaire est de nouveau augmentée jusqu'à ce que les lampes indicatrices du circuit secondaire éclairent normalement. Celles du circuit primaire éclairent avec la même intensité que celles du secondaire. Lors de la mesure suivante, une bobine de 1200 spires est utilisée au secondaire. La tension primaire est augmentée jusqu'à ce que les lampes du circuit primaire éclairent normalement. Celles du circuit secondaire ne donnent que la moitié de leur luminosité. Si l'une d'elles est dévissée, l'autre éclaire avec une intensité normale.

Cette série de mesures prouve que, dans un transformateur, le produit du courant par la tension, côté primaire et côté secondaire, est le même. Cette affirmation n'est exacte que pour un transformateur sans pertes. Le rendement de la plupart des grands transformateurs est cependant si élevé que les pertes peuvent être négligées pour ces observations fondamentales.
Nous pouvons écrire :

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

La puissance primaire correspond à celle du secondaire.
Par une simple modification les courants peuvent s'obtenir dans une relation où le rapport de transformation intervient.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2},\ U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \text{ d'où : } \frac{U_1 \cdot I_1}{I_2} = U_2 \text{ d'où}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \text{ d'où : } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}}$$

Dans le transformateur, les courants sont inversement proportionnels aux nombres de spires.

L'influence du noyau de fer est démontrée par l'expérience suivante. Dans le dispositif d'essai, selon les figures 214 et 215, la tension secondaire est mesurée.

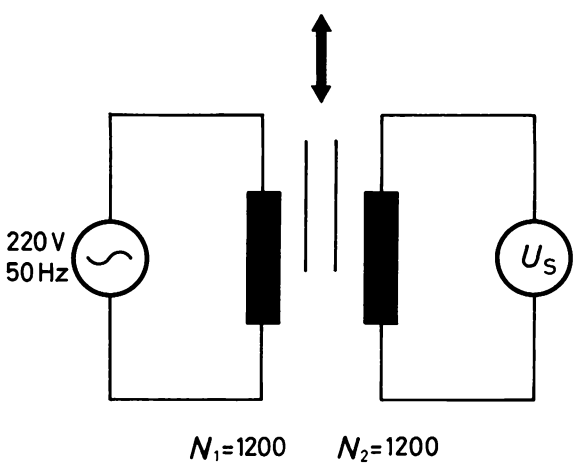


Figure 214

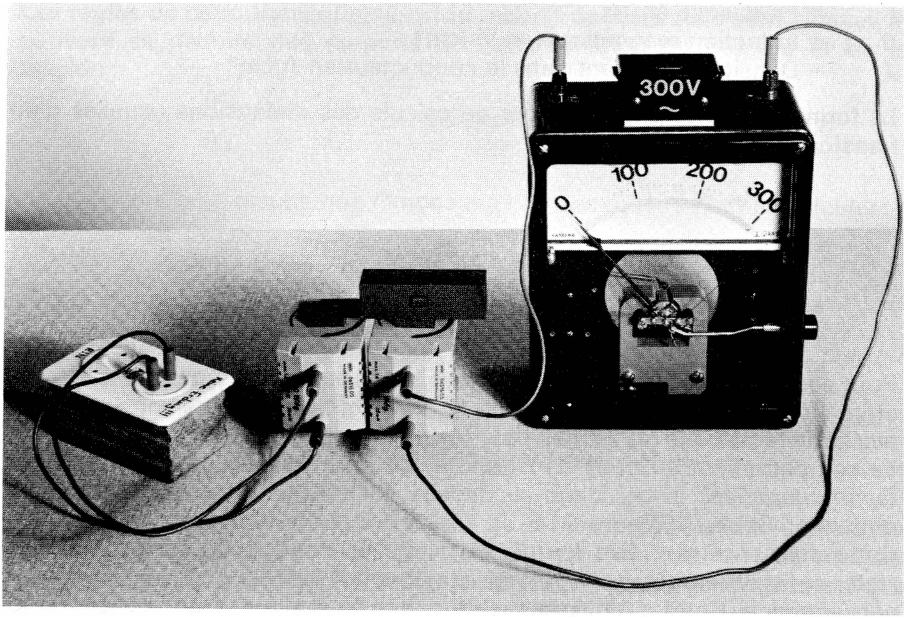


Figure 215

Pour effectuer la première mesure, l'armature est enlevée : le noyau n'est pas fermé. L'armature est alors remise en place sur le noyau et la tension secondaire est comparée avec celle de première mesure. La tension mesurée sur le secondaire, lors du deuxième essai est nettement plus élevée. Si l'on retire lentement l'armature, une baisse de la tension peut être observée. Cette expérience montre que la constitution du noyau de fer est d'une grande importance pour le transformateur. Mieux le noyau est fermé, d'autant plus élevée est l'induction magnétique et par conséquent la tension induite. Le noyau est la cause d'un meilleur rendement, de plus faibles pertes et diminue les dimensions du transformateur. La grandeur du noyau dépend premièrement de la puissance à transmettre, de l'induction magnétique et de la fréquence.
La formule exacte pour calculer la section du noyau est :

$$A_{Fe} = \sqrt{\frac{P\, k_{Cu/Fe}}{f \cdot B \cdot J}} \; ; \; [A_{Fe}] = \sqrt{\frac{VA \cdot s \cdot cm^2 \cdot cm^2}{Vs \cdot A}} = cm^2$$

A_{Fe} = Section du fer en cm²
P = Puissance à transmettre en VA
$k_{Cu/Fe}$ = Rapport entre le poids du cuivre et celui du fer (1 à 1,5)

f = Fréquence en Hz
B = Induction magnétique en Vs/cm²
J = Densité de courant dans le conducteur en A/cm²

La formule peut se simplifier lors de calculs des dimensions usuelles d'un transformateur.

$$A_{Fe} \approx 5 \cdot \sqrt{\frac{P}{f}}$$

A_{Fe} = en cm²
P = en VA
f = en Hz

Pour cette formule simplifiée on a admis une densité de courant de 3 A/mm² et une induction magnétique de $12 \cdot 10^{-2}$ Vs/cm². Ces valeurs correspondent aux caractéristiques moyennes pour les transformateurs.
Le comportement du *transformateur chargé* peut être décrit comme suit *de façon simplifiée*: le bobinage secondaire est chargée avec une résistance ohmique. Selon la figure 216, la résistance prélève la puissance $U_2 \cdot I_2$. Cette puissance doit être fournie au primaire. Puisque la tension primaire reste constante, même en charge, le courant primaire I_1 augmente en conséquence. Cette augmentation de courant est provoquée par le champ magnétique du courant secondaire. Celui-ci donne naissance, dans le bobinage secondaire, au flux Φ_2.
Les deux courants étant en opposition de phase, le flux primaire Φ_1 est aussi opposé au flux secondaire Φ_2. La différence entre ces deux flux doit correspondre au flux lorsqu'il n'y a pas de charge. Par rapport au fonctionnement à vide, le bobinage primaire va prélever juste assez de courant supplémentaire, résultant de l'affaiblissement du flux primaire, pour compenser le flux nécessaire au secondaire. L'effet de la résistance de charge au secondaire est reporté sur le côté primaire.

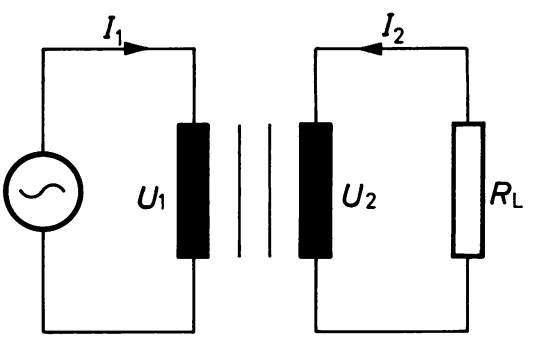


Figure 216

Les règles de cette transformation (ou report) de résistance sont simples et peuvent se déduire des rapports de transformation du courant et de la tension :

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}, \text{ d'où il s'ensuit que : } U_2 = \frac{U_1}{\ddot{u}} \text{ et } I_2 = \ddot{u} \cdot I_1$$

d'où il résulte que l'impédance du secondaire peut se calculer :

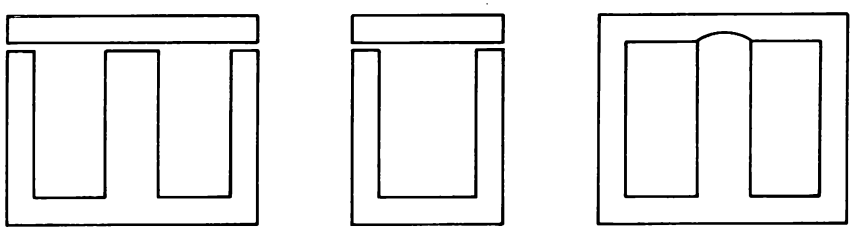
$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1}{\ddot{u} \cdot \ddot{u} \cdot I_1} = \frac{U_1}{\ddot{u}^2 \cdot I_1} = \frac{Z_1}{\ddot{u}^2} \text{ d'où } \frac{Z_1}{Z_2} = \ddot{u}^2$$

Les impédances sont transformées (ou reportées) avec le carré du rapport de transformation.

h. Formes de réalisation des transformateurs

Transformateurs de réseau

Dans les appareils, les *transformateurs de réseau* sont destinés à produire les tensions d'alimentation. La grandeur du transformateur est déterminée par la puissance qu'il doit fournir au secondaire. Le rendement moyen des transformateurs de réseau se situe entre 80% et 90%. Le plus souvent les noyaux de fer ont des coupes normalisées en E/I, M ou U/I. La figure 217 montre la forme des tôles pour les coupes mentionnées ci-dessus.



Coupe E/I | Coupe U/I | Coupe M

Figure 217

Pour les appareils à tubes électroniques, le secondaire est composé en général d'un bobinage pour les tensions anodiques d'un ou de deux bobinages pour les tensions de chauffage. Dans les appareils à transistors des tensions secondaires assez basses sont juste nécessaires. La figure 218 montre un transformateur de réseau.

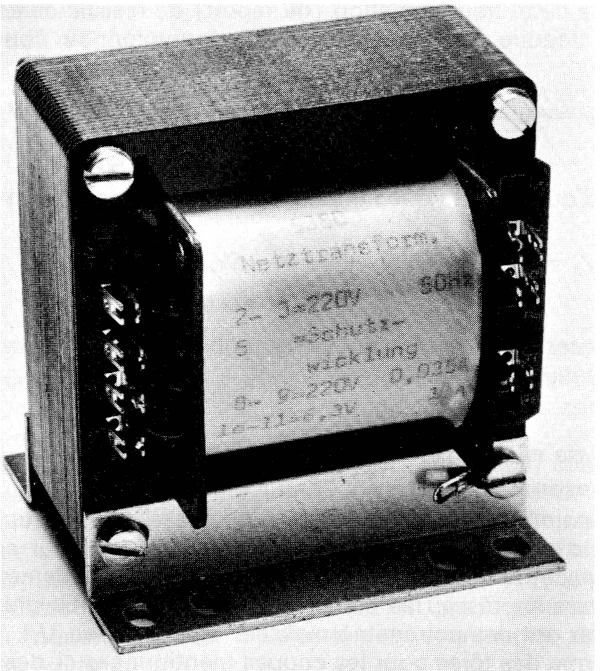


Figure 218

Transformateur réglable

Les *transformateurs réglables* permettent une variation continue de la tension secondaire. Ils ne comportent souvent qu'un bobinage formé d'une seule couche de fil enroulé autour d'un noyau annulaire (nommé communément : variac). Un contact mobile (ou curseur) se déplace sur toute l'étendue du bobinage ce qui permet de choisir une tension quelconque entre zéro et la tension d'entrée. Le symbole du transformateur réglable est donné par la figure 219.

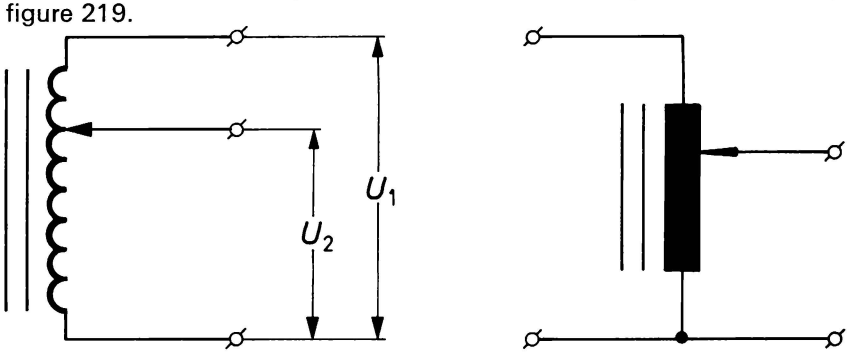


Figure 219

Les transformateurs variables sont employés chaque fois qu'une tension doit être réglée avec précision.

Transformateurs basse fréquence (translateur, en téléphonie)
Les *transformateurs basse fréquence*, selon leur domaine d'utilisation, doivent avoir une courbe de transmission linéaire entre 30 Hz et 20 kHz. La plus basse fréquence à transmettre détermine l'inductance du primaire du transformateur. La fréquence supérieure est limitée par la capacité du bobinage et la dispersion. Les capacités des bobinages, conjointement avec les inductances provoquent une résonance propre du transformateur. L'apparition de cette résonance est souvent mise à profit pour élever la limite supérieure de transmission. On distingue deux sortes de transformateurs basse fréquence :

- Les transformateurs d'entrée dont le secondaire travaille pratiquement sans charge (par exemple, le transformateur d'entrée d'un amplificateur à tubes).
- Les transformateurs qui sont chargés au secondaire (par exemple, les transformateurs de sortie ou les transformateurs de couplage entre les étages à transistors).

Les transformateurs d'entrée, qui ne reportent pratiquement aucune puissance ont par conséquent des dimensions très réduites. La figure 220 a montre la photo d'un tel transformateur.

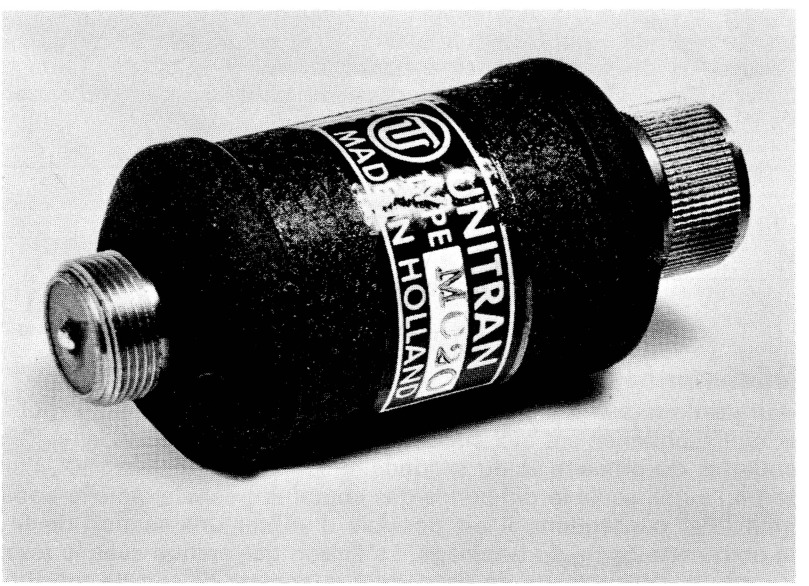


Figure 220a

Les transformateurs de sortie effectuent la liaison entre l'étage de sortie d'un amplificateur basse fréquence et le haut-parleur. De plus, ils assurent l'adaptation de la basse impédance du haut-parleur avec le tube ou le transistor de sortie. Par suite du courant continu anodique ou de collecteur qui s'écoule à travers le bobinage primaire du transformateur son noyau est aimanté. Les distorsions qui en résultent sont diminuées en ménageant un entrefer dans celui-ci de façon à réduire l'influence de l'aimantation. La figure 220 b montre un transformateur de sortie d'une puissance de 5 watts.

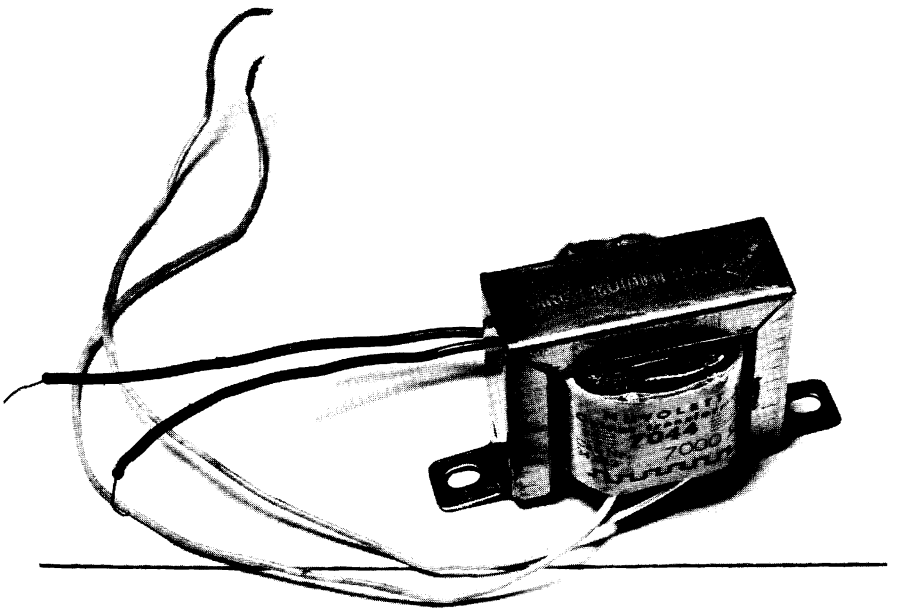


Figure 220b

Autotransformateur

L'*autotransformateur* n'a qu'un seul bobinage. Une partie du bobinage appartient simultanément aux circuits du primaire et du secondaire. Puisque les courants du primaire et du secondaire sont déphasés de 180°, l'un par rapport à l'autre, seule la différence des courants s'écoule dans le bobinage commun. Par conséquent, il est possible d'utiliser une section de fil plus faible pour cette partie du bobinage. La liaison galvanique avec le réseau a, par contre, le désavantage de ne permettre aucune liaison de tension à la masse (ou aucune mise à terre) car dans les réseaux avec conducteur neutre

il en résulterait un court-circuit ; en outre, les appareils alimentés par un autotransformateur peuvent mettre en danger de mort le personnel qui les utilise. La figure 221 donne le schéma d'un autotransformateur.

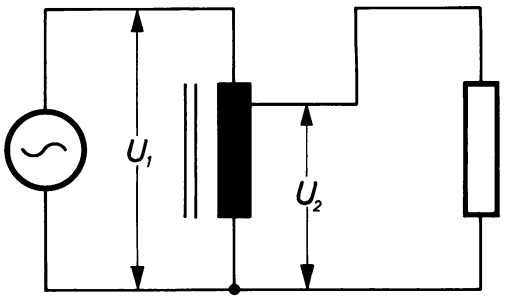


Figure 221

Transformateurs produisant des impulsions

Ce *transformateur spécial* permet de *produire des impulsions* à partir d'une tension sinusoïdale. Il est souvent utilisé pour la commande de thyratrons. Ce transformateur comprend un primaire et un secondaire placés sur un noyau composé de deux matériaux différents. Selon la figure 222 la partie « 1 » du noyau est en tôles ordinaires pour transformateurs tandis que l'armature « 2 » est en tôle spéciale extrêmement perméable. La courbe magnétique de cette tôle passe de façon abrupte dans l'état de saturation (alliages hypermagnétiques contenant beaucoup de Ni).

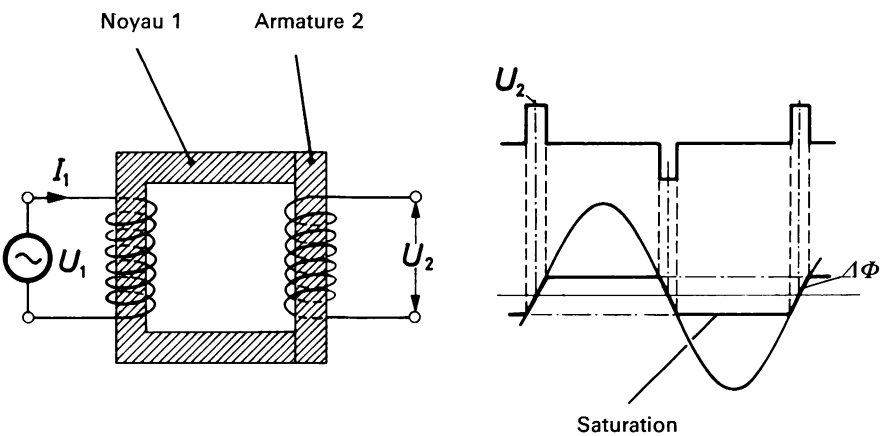


Figure 222

De plus, les dimensions de l'armature sont telles que celle-ci est déjà saturée par le flux magnétique aussitôt après le passage du courant par zéro. Dans la zone de saturation le flux magnétique reste constant et aucune tension n'est induite dans la bobine secondaire. Au contraire, pendant la variation de flux une puissante impulsion de tension se produit. Le sens de cette impulsion dépend du sens de la variation du flux. Les impulsions se produisent au moment du passage à zéro du courant primaire. Le diagramme de la figure 222 montre la relation entre le flux magnétique dans l'armature et la tension induite dans le bobinage secondaire.

i. Caractéristiques

Les données suivantes caractérisent les transformateurs :

- *Les tensions nominales*, du primaire et du secondaire pour lesquelles le transformateur est prévu.
- *La puissance nominale* est la puissance qui peut être prélevée sur les bobinages secondaires.
- *La gamme de fréquences* est celle de la largeur de bande pour laquelle le transformateur est construit. La plus basse fréquence de travail détermine la section du fer et, en conséquence le poids du transformateur.
- *Le rendement* est le rapport entre la puissance fournie à la sortie du transformateur et celle qu'il prélève à son entrée.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_d}$$

P_1 = puissance prélevée par le transformateur, P_2 = puissance fournie par le transformateur
P_d = puissance transformée en chaleur dans le transformateur

Le rendement des transformateurs de grande puissance est très élevé, il se situe entre 97 et plus de 99%. Les petits transformateurs ont un rendement plus faible en rapport avec leur grandeur. Les pertes dans le transformateur sont : les pertes dans le fer, hystérésis et courants de Foucault ; les pertes dans le cuivre : résistance ohmique des bobinages et courants de Foucault.

4. Exemples

a. Le coefficient de couplage

Les bobines L_1 et L_2, de la figure 223, sont couplées inductivement. Il faut calculer le flux dans la bobine secondaire.

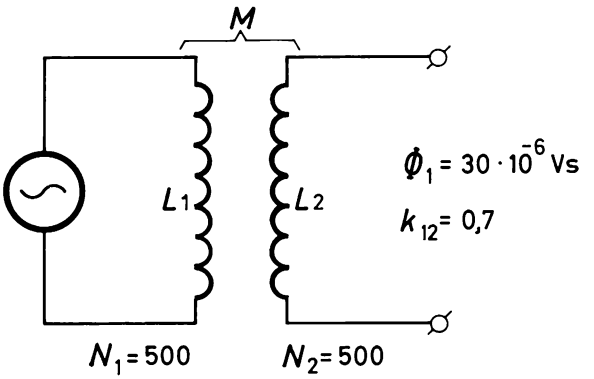


Figure 223

Marche à suivre:

- écrire la formule de base du coefficient de couplage — $k = \dfrac{\Phi_2}{\Phi_1}$
- extraire Φ_2 de la formule — $\Phi_2 = \Phi_1 \cdot k$
- introduire les valeurs et calculer — $\Phi_2 = 0{,}7 \cdot 30 \cdot 10^{-6}$

$\Phi_2 = \mathbf{21 \cdot 10^{-6}\ Vs}$

b. Coefficient de dispersion

Le coefficient de dispersion entre L_1 et L_2 doit être calculé (données du problème a).

Marche à suivre:

- écrire la formule de base — $\sigma = \dfrac{\Phi_s}{\Phi_1}$
- écrire la formule de Φ_s — $\Phi_s = \Phi_1 - \Phi_2$
- compléter la formule — $\sigma = \dfrac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1}$
- introduire les valeurs et calculer — $\sigma = \dfrac{30 \cdot 10^{-6} - 21 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-6}}$

$\sigma = \mathbf{0{,}3}$

c. Induction mutuelle

Calculer les inductances des bobines L_1 et L_2 ainsi que l'induction mutuelle du transformateur de l'exercice a (I_1 = 0,2 A).

Marche à suivre:

Première étape: calcul des inductances L_1 et L_2

- écrire la formule de base — $L_1 = L_2 = \dfrac{\Phi_1}{I_1}, N$; ($\mu_r$ constant)

Cette formule de l'inductance peut être dérivée des règles de l'électromagnétisme. Si nous nous référons au chapitre « Electromagnétisme » (page 64) nous trouvons la formule suivante pour le flux :

$$\Phi = B \cdot A$$

– pour B on a : $B = \mu_o \cdot \mu_r \cdot H$

– pour H on a : $H = \dfrac{I \cdot N}{l}$

– cette dernière égalité, introduite dans la formule de base de Φ donne l'équation suivante :

$\Phi = \dfrac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot I \cdot N}{l} \cdot A$ En transposant I à gauche on a :

$\dfrac{\Phi}{I} = \dfrac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot N}{l} \cdot A$ En multipliant par N des deux côtés on a :

$\dfrac{\Phi}{I} \cdot N = \dfrac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot N_2}{l} \cdot A$ L'expression de droite correspond à la formule du calcul de l'inductance

Il va de soi que le praticien ne doit pas connaître ces déductions par cœur. Il n'est question ici que de montrer d'où provient cette nouvelle formule de l'inductance.

Nous continuons la résolution de notre exemple :

– introduire les valeurs et calculer $L_1 = L_2 = \dfrac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}5 \cdot 10^3}{0{,}2} \dfrac{\text{Vs}}{\text{A}}$

$L_1 = L_2 = \mathbf{75\ mH}$

Deuxième étape : calcul de l'induction mutuelle

– écrire la formule de base $M = \dfrac{\Phi_2}{I_1} \cdot N_2$

– introduire les valeurs et calculer $M = \dfrac{21 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}5 \cdot 10^3}{0{,}2} \dfrac{\text{Vs}}{\text{A}}$

$M = \mathbf{52{,}5\ mH}$

– contrôle $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$

– introduire les valeurs et calculer $M = 0{,}7 \cdot 75 \cdot 10^{-3}$

$M = 52{,}5\ \text{mH}$

d. Transformateur

Le transformateur de sortie, de la figure 224, sert à adapter la basse impédance du haut-parleur à la haute impédance de l'étage final (ou : de sortie).

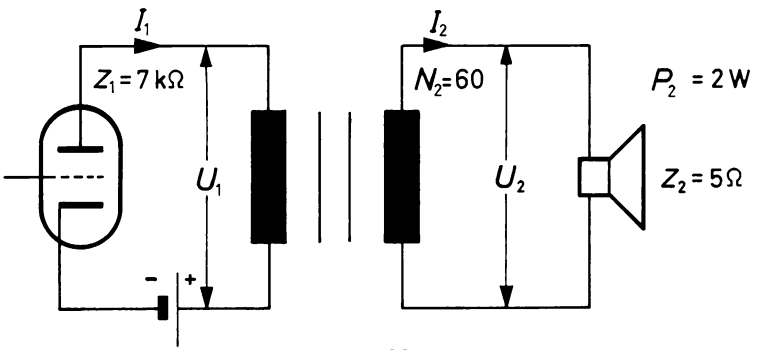


Figure 224

En admettant les simplifications suivantes : coefficient de couplage = 1, pas de pertes dans le transformateur, calculer les valeurs ci-dessous :

N_1, U_2, U_1, I_2, I_1

Marche à suivre:

Première étape: déterminer le rapport de transformation

– *écrire la formule* $\ddot{u} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$

– *introduire les valeurs et calculer* $\ddot{u} = \sqrt{\frac{7 \cdot 10^3}{5}}$

$\ddot{u} = 37{,}42$

Deuxième étape : calculer le nombre de spires du primaire

– écrire la formule de base $\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$

– extraire N_1 de la formule $N_1 = \ddot{u} \cdot N_2$

– introduire les valeurs et calculer $N_1 = 37{,}4 \cdot 60$

$N_1 = \mathbf{2245\ spires}$

Troisième étape : calcul de la tension et du courant au secondaire

– écrire la formule de base $P_2 = \frac{U_2^2}{Z_2}$

– extraire U_2 de la formule $U_2 = \sqrt{Z_2 \cdot P_2}$

– introduire les valeurs et calculer $U_2 = \sqrt{5 \cdot 2}$; $[U_2] = \sqrt{\frac{V}{A} \cdot VA} = V$

$U_2 = \mathbf{3{,}162\ V}$

– écrire la formule de base $P_2 = I^2_2 \cdot Z_2$

– extraire I_2 de la formule $I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{Z_2}}$

– introduire les valeurs et calculer $I_2 = \sqrt{\frac{2}{5}}$; $[I_S] = \sqrt{\frac{VA \cdot A}{V}} = A$

$I_2 = \mathbf{0{,}6325\ A}$

– contrôle $P_2 = U_2 \cdot I_2$

$P_2 = 3{,}162 \cdot 0{,}6325$

$P_2 = 2\ W$

Quatrième étape : calcul du courant et de la tension du primaire

– écrire la formule de base $\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2}$

– extraire U_1 de la formule $U_1 = \ddot{u} \cdot U_2$

– introduire les valeurs et calculer $U_1 = 37{,}42 \cdot 3{,}162$

$U_1 = \mathbf{118{,}3\ V}$

– écrire la formule de base $\ddot{u} = \frac{I_2}{I_1}$

– extraire I_1 de la formule $I_1 = \frac{I_2}{\ddot{u}}$

– introduire les valeurs et calculer $I_1 = \frac{0{,}6325}{37{,}42}$

$I_1 = \mathbf{16{,}9\ mA}$

Contrôle : $I_1 \cdot U_1$ doit être égal à 2 W

– écrire la formule $I_1 \cdot U_1 = 2\ W$

– introduire les valeurs et calculer $16{,}9 \cdot 10^{-3}\ A \cdot 118{,}3\ V = 2\ W$

5. L'essentiel

Le transformateur – comme son nom l'indique – ne transforme que des tensions et des courants alternatifs.
Le *coefficient de couplage k* donne la mesure du degré de couplage entre deux bobines. Il s'exprime par le rapport entre le flux qui coupe la bobine secondaire et le flux total produit dans la bobine primaire.
Le *coefficient de dispersion* σ donne la mesure de la dispersion qui se produit entre deux bobines couplées. Il correspond au rapport entre le flux de dispersion et le flux total.
L'*induction mutuelle M* donne une mesure de l'influence réciproque entre deux bobines voisines au travers de leur champ magnétique commun.
Le *rapport de transformation* $\ddot{u}$ est celui qui existe entre le nombre de spires du primaire et le nombre de spires du secondaire. Dans le transformateur, les tensions sont reportées proportionnellement au rapport de transformation tandis que les courants sont transformés de façon inversement proportionnelle à ce rapport. Les impédances sont reportées avec le carré du rapport de transformation.
Dans un transformateur non chargé, un déphasage de 180° règne entre la tension au primaire et celle au secondaire. Dans un transformateur chargé par une résistance ohmique, le déphasage entre le courant primaire et secondaire est plus petit que 180°.
Le *noyau de fer* augmente le rendement du transformateur. Sa section augmente avec la racine carrée de la puissance transmise et diminue avec la racine carrée de la fréquence de travail.
L'alimentation des appareils électriques est assurée par des *transformateurs de réseau.*
Les *transformateurs variables* permettent un réglage continu de la tension secondaire. Les *transformateurs basse fréquence* servent à reporter des signaux de basse fréquence et pour l'adaptation d'impédances. L'*autotransformateur* ne possède qu'un seul bobinage. Une partie du bobinage est utilisée en commun pour les tensions primaire et secondaire. Ce mode de faire permet d'économiser la section du fer et celle du cuivre par rapport au même transformateur ayant des bobinages primaire et secondaire séparés.
Le *transformateur produisant des impulsions* délivre dans son bobinage secondaire une impulsion pendant le passage à zéro du courant primaire. Ce type de transformateur est utilisé pour des commandes (en électronique).

6. Exercices de répétition (solutions page 469)

a) Le coefficient de couplage entre les bobines primaire et secondaire d'un transformateur est de 95%. Qu'est-ce que cela signifie en ce qui concerne le rapport entre le flux primaire et le flux secondaire ?
b) Le coefficient de couplage total d'un transformateur est estimé à 92%. Quel est son coefficient de dispersion total ?

c) Des inductances $L_1 = 5$ H et $L_2 = 3$ H sont couplées. Le coefficient de couplage total est de 0,6. Calculez l'induction mutuelle de l'ensemble.
d) Nommez deux coefficients qui déterminent la section du fer d'un transformateur.
e) Expliquez pourquoi, dans un transformateur non chargé, le déphasage entre la tension primaire et la tension secondaire est de 180°.
f) Nommez les avantages et les inconvénients d'un autotransformateur.
g) Le transformateur de sortie de la figure 225 doit adapter la résistance de charge du haut-parleur à la résistance de travail du tube final. Calculez les grandeurs suivantes :
   – l'impédance primaire Z_1
   – le rapport de transformation $\ddot{u}$.

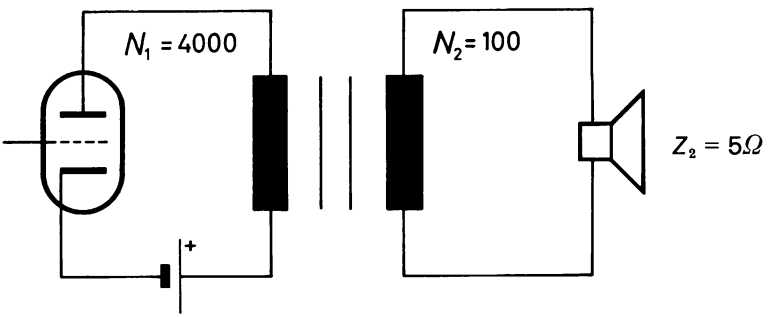


Figure 225

VII. Le circuit oscillant série

1. Introduction

Les circuits oscillants jouent un grand rôle dans la technique des télécommunications et en électronique. Aucun appareil de radio ne peut se concevoir sans qu'il ne contienne un certain nombre de circuits oscillants. La téléphonie et la télégraphie en multiplex sont basées sur le nombre de circuits interconnectés compliqués dont les éléments ou composants de base sont les circuits oscillants. Même le plus simple des récepteurs, le détecteur, nécessite un circuit oscillant.

L'importance du circuit oscillant réside dans la propriété qu'il possède de sélectionner une fréquence bien déterminée dans un spectre de fréquences. Lorsque nous choisissons une fréquence déterminée, sur un appreil récepteur, nous accordons un circuit oscillant au moyen d'un condensateur variable jusqu'à ce que la fréquence désirée soit reçue. Lorsque nous pressons sur l'une des touches du sélecteur de canaux d'un téléviseur, pour voir un certain programme, nous accordons des circuits oscillants sur la fréquence de l'émetteur désiré. L'opérateur d'un émetteur qui règle son appareil sur un canal déterminé accorde en un seul mouvement toute une série de circuits oscillants sur la fréquence qui lui a été ordonnée. L'opérateur qui règle une grosse station sur la fréquence prescrite accorde divers circuits oscillants sur la longueur d'onde correspondante.

Les circuits oscillants peuvent se comparer aux filtres colorés en optique. Un filtre rouge ne laisse passer, de l'ensemble du spectre lumineux, que la longueur d'onde correspondant à la couleur rouge. Un filtre vert se comporte de la même manière en ce qui concerne la longueur d'onde de la lumière verte. L'énumération ci-dessus fait apparaître l'importance des circuits oscillants ce qui pourrait laisser supposer qu'il s'agit là d'une création vraiment compliquée. Cependant, il n'en est rien car les circuits oscillants les plus utilisés sont composés uniquement de capacités et d'inductances formant des circuits série ou parallèle.

Les circuits oscillants ne représentent qu'un cas particulier des circuits série et parallèle, composés de résistances et de réactances, que nous avons déjà traité.

2. Que savez-vous au sujet des circuits oscillants série ? (solutions page 471)

a) De quels éléments se composent les circuits oscillants série ?
b) Que signifie l'expression « fréquence de résonance » ?
c) La qualité de la bobine joue-t-elle un rôle dans le comportement du circuit oscillant ?
d) Pourquoi, pour la plupart des circuits oscillants, le facteur de pertes tg δ du condensateur est-il sans importance ?
e) Connaissez-vous un exemple d'utilisation d'un circuit oscillant série ?

f) On a mentionné, dans l'introduction, que les circuits oscillants ne sont que des cas particuliers de circuits série ou parallèle composés d'impédances et de résistances. Pouvez-vous dire en quoi consiste cette particularité ?

3. Le circuit oscillant série

a. La composition du circuit oscillant

Le *circuit oscillant série* se compose de la mise en série d'une bobine et d'un condensateur. Puisque bobines et condensateurs ne se présentent pas comme des réactances pures mais qu'ils possèdent toujours des pertes, celles-ci sont réunies en une *résistance de pertes série* commune. En pratique, les pertes dans le condensateur peuvent, le plus souvent, être négligées car elles sont beaucoup plus petites que celles dans la bobine. La figure 226 montre un circuit oscillant série.

Figure 226

b. Le comportement du circuit oscillant série

Par une expérience, nous allons étudier le comportement d'un circuit oscillant série. La figure 227 nous en montre le schéma et la figure 228 le montage.

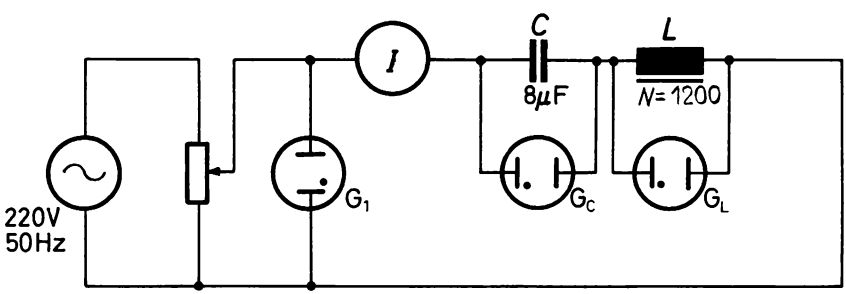


Figure 227

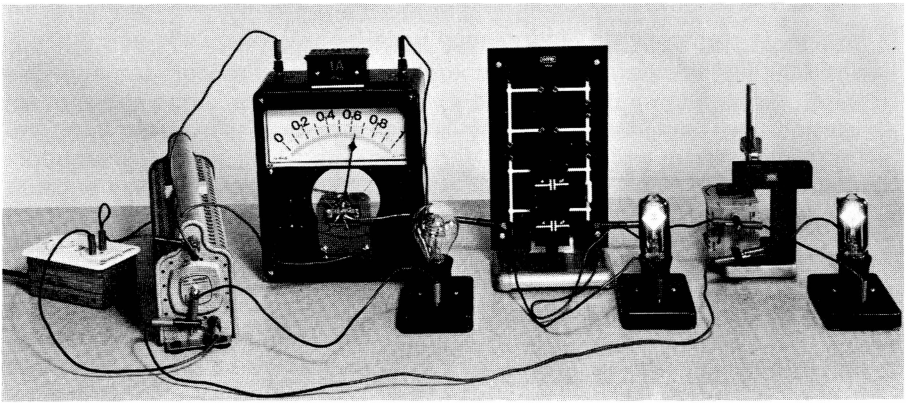


Figure 228

Au début de l'expérience, les tensions d'allumage des lampes au néon sont évaluées en reliant chaque lampe à une tension continue variable. Cette dernière est augmentée jusqu'à ce que la lampe s'allume. Les tensions d'allumage se situent aux environs de 130 V.
D'après le schéma de la figure 227, la tension au diviseur de tension est ajustée de façon à ce que la lampe au néon G 1 *ne s'allume pas*. Maintenant, l'armature est déplacée lentement sur la bobine tout en observant l'ampèremètre. Le courant augmente lentement pour atteindre une valeur maximale puis diminue de nouveau. Dès que le courant atteint la zone de sa valeur maximale, les lampes au néon, aux bornes de la bobine et du condensateur s'allument. La lampe au néon G 1, sur le diviseur de tension, reste sombre. Nous constatons que :

- Le déplacement de l'armature, sur la bobine, modifie la valeur de l'inductance. Dans le circuit, pour une valeur bien déterminée de l'inductance de la bobine, le courant atteint sa valeur maximale.
- Aux bornes du circuit, pendant toute la durée de l'expérience, la tension reste au-dessous de la tension d'allumage de la lampe au néon G 1.
- Au maximum du courant, les tensions aux bornes de la bobine et du condensateur montent considérablement : elles dépassent la tension d'allumage des lampes au néon G_L et G_C.
- *La tension aux bornes de la bobine et du condensateur est plus grande que la tension aux bornes du circuit entier.*

Le résultat de ces mesures, qui paraît étrange au premier coup d'œil, s'explique facilement grâce à l'utilisation du diagramme vectoriel. Le circuit oscillant série doit être considéré, avant tout, comme un simple circuit série composé d'une bobine, d'un condensateur et d'une résistance. Dans le montage expérimental, la résistance en série est représentée par les pertes dans la bobine.

La figure 229 montre à nouveau le circuit série. En déplaçant l'armature de la bobine, la réactance de l'inductance varie jusqu'à ce qu'elle soit égale à celle du condensateur.

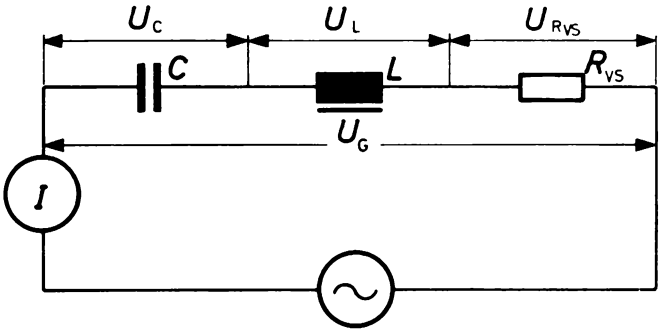


Figure 229

Le diagramme vectoriel de la figure 230 montre que l'effet des deux réactances s'annule. L'impédance atteint ainsi sa valeur la plus faible et se comporte comme une résistance purement ohmique.

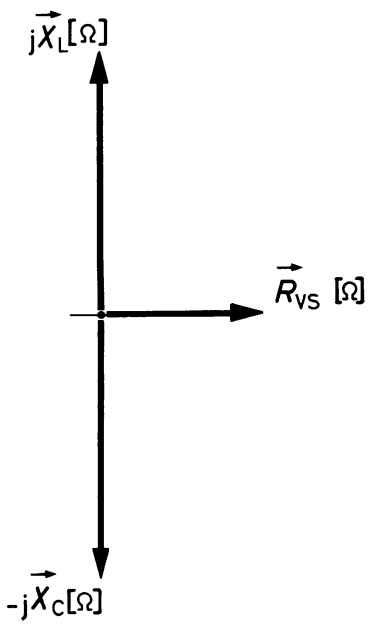


Figure 230

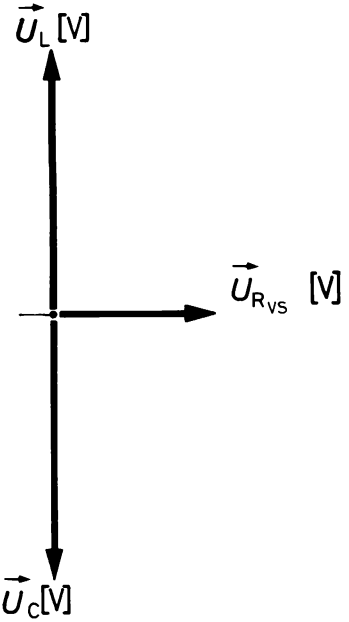


Figure 231

Dans le circuit, le courant atteint ainsi sa valeur la plus grande. Les tensions, dans le circuit série, sont reportées sur la figure 231. Le diagramme nous explique pourquoi la tension totale, aux bornes du circuit, est plus petite que les tensions partielles aux bornes de la bobine et du condensateur. Puisque les deux réactances sont de valeurs égales, les tensions aux bornes de l'inductance et de la capacitance sont également de même valeur. Mais, puisque ces tensions sont en opposition de phase, leurs effets s'annulent. La tension effective restante aux bornes du circuit est représentée par la chute de tension dans la résistance ohmique.

c. Conditions régissant la résonance

La fréquence, pour laquelle le circuit oscillant série atteint sa plus petite impédance se nomme : *fréquence de résonance.* Le circuit oscillant se trouve en *résonance*.
La *condition régissant la résonance* s'énonce ainsi :
Quand, dans le circuit oscillant série, l'inductance et la capacitance sont égales le circuit entre en résonance.

d. La formule de Thomson du circuit oscillant

La *formule de Thomson, pour le circuit oscillant,* dérive des conditions régissant la résonance. Cette formule permet le calcul de la fréquence de résonance des circuits oscillants. Pour développer cette formule nous partons des conditions de la résonance :

- Conditions régissant la résonance $X_L = X_C$

  $\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C}$

- Faire passer la pulsation dans le terme de gauche $\omega_o^2 L = \frac{1}{C}$

- extraire la pulsation $\omega_o^2 = \frac{1}{L \cdot C}$

- extraire la racine carrée $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = 2\pi f_o$

- extraire f_o $f_o = \frac{1}{\mathbf{2\pi\sqrt{L \cdot C}}}$

e. La courbe de résonance

Les propriétés du circuit oscillant se représentent concrètement par des *courbes de résonance.* Dans le cas du circuit série, la courbe de résonance montre le tracé de l'impédance ou du courant en fonction de la fréquence. Au moyen de l'expérience suivante on montre comment la courbe de résonance est déterminée par des mesures techniques.

La figure 232 montre le schéma de l'expérience et la figure 233 la disposition du montage de mesure.

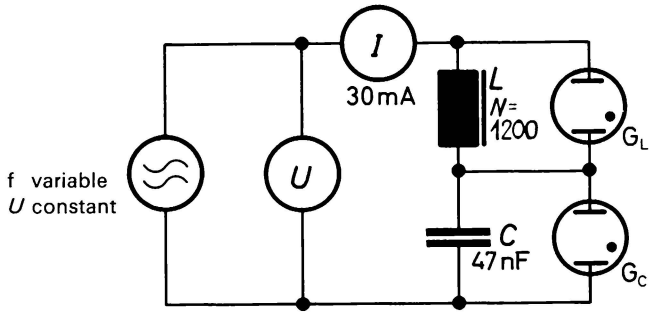


Figure 232

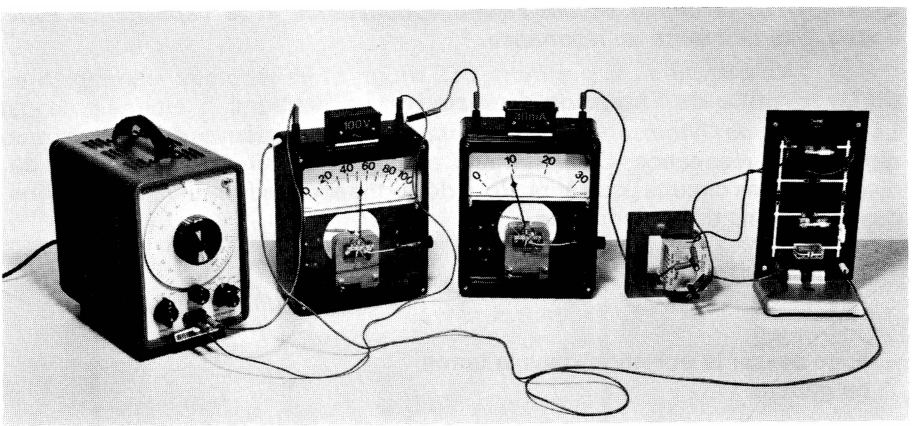


Figure 233

En premier lieu, la fréquence est variée jusqu'à ce qu'un maximum de courant s'établisse ce qui indique la résonance. Puis la tension du générateur BF est modifiée de façon à ce qu'un courant de 30 mA s'écoule. Maintenant, la fréquence et la tension sont encore ajustées jusqu'à ce que le courant soit vraiment de 30 mA à la résonance. Au cours des mesures suivantes, la tension que l'on vient de mesurer est maintenue constante. Ensuite, la fréquence est variée par petites valeurs de part et d'autre de la fréquence de résonance et pour chaque mesure la valeur du courant est reportée sur le diagramme. Ce dernier indique la courbe de résonance du courant. La figure 234 représente une courbe de résonance du courant et la courbe de l'impédance correspondante. Cette dernière présente un minimum lorsque le courant atteint son maximum.

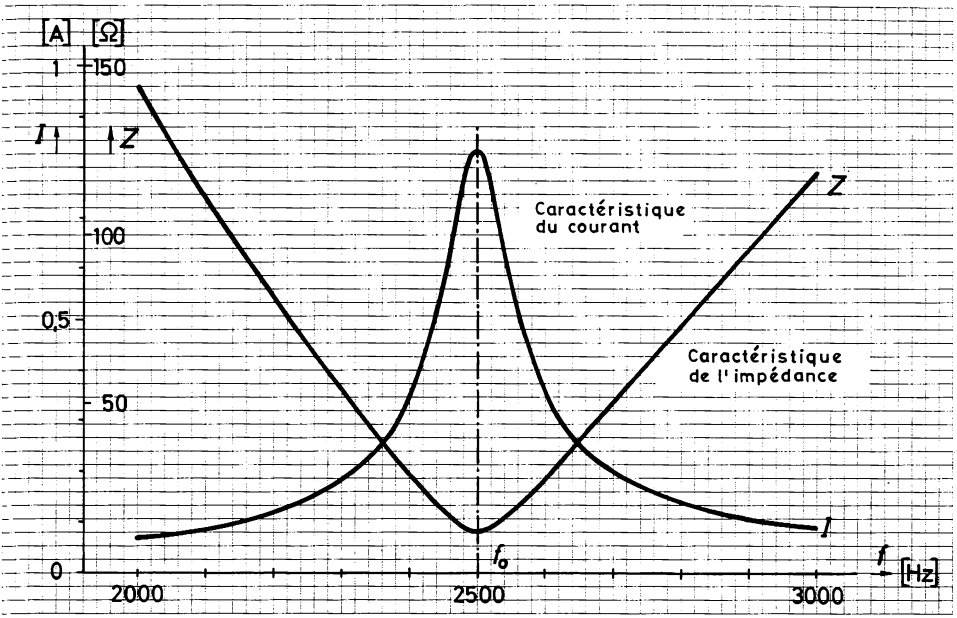


Figure 234

f. La qualité du circuit Q

La qualité du circuit oscillant s'exprime par le *facteur de qualité*. Pour la grande majorité des circuits oscillants ce facteur de qualité est déterminé par l'inductance car les pertes dans la bobine sont bien plus grandes que celles dans le condensateur. Dans ce cas, la qualité de l'inductance Q_L peut s'identifier à la *qualité du circuit*. Par conséquent, nous pouvons écrire:

$$Q = \frac{X_L}{R_{vs}} \qquad R_{vs} = \text{Résistance de pertes de la bobine}$$

Pour le circuit oscillant série, la qualité du circuit Q exprime les relations suivantes:

- A la résonance, les tensions partielles aux bornes de la bobine et à celles du condensateur sont Q fois plus grandes que la tension aux bornes du circuit (facteur de surtension).
- A la résonance, les réactances capacitive et inductive sont Q fois plus grandes que la résistance de résonance du circuit.

La valeur réciproque (l'inverse) de la qualité du circuit donne le *facteur d'amortissement d*.

$$d = \frac{1}{Q}$$

g. La largeur de bande b (ou bande passante)

La *largeur de bande b* du circuit oscillant série est la zone de passage de la courbe du filtre mesurée entre deux points de celle-là pour lesquels le courant est plus faible que $1/\sqrt{2}$ (ou 0,707) fois celui de la résonance. La largeur de bande est déterminée par la fréquence de résonance et la qualité du circuit. Plus la qualité du circuit est bonne d'autant plus étroite sera la largeur de bande. La relation entre la largeur de bande et la qualité du circuit est concrétisée par l'équation suivante :

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

La figure 235 montre l'estimation graphique de la largeur de bande du circuit oscillant série.

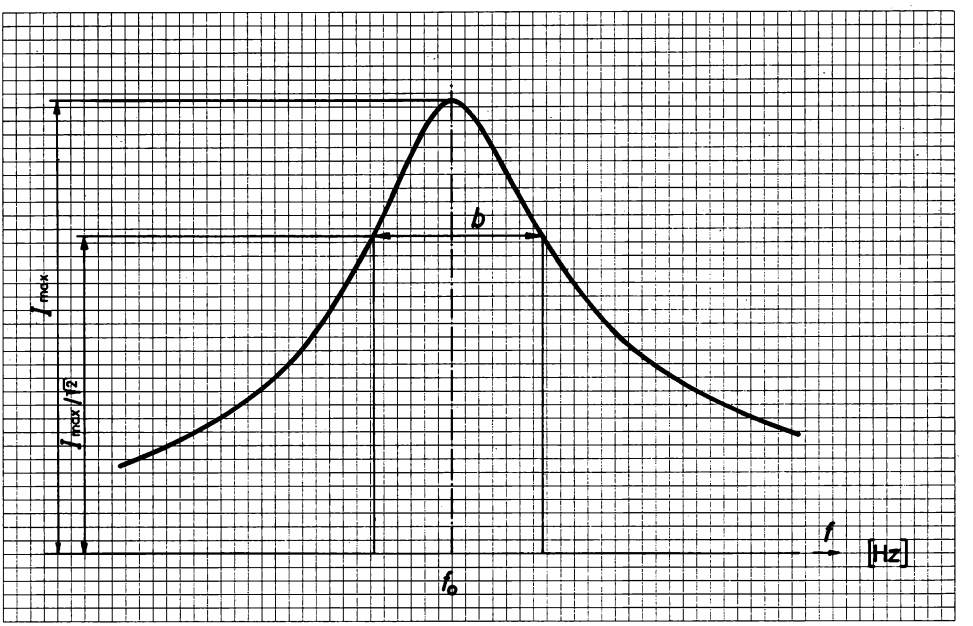


Figure 235

4. Exemples

a. Calcul d'un circuit série

Calculer la fréquence de résonance, la qualité du circuit et la largeur de bande du circuit oscillant série de la figure 236.

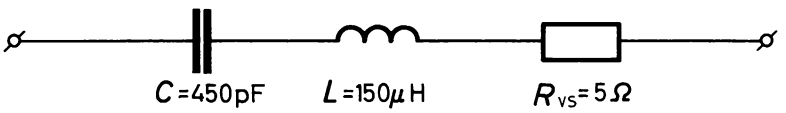


Figure 236

Marche à suivre:

Première étape : calcul de la fréquence de résonance

– écrire la formule de base $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$; $[f_o] = \frac{1}{\sqrt{\text{As/V} \cdot \text{Vs/A}}} = \frac{1}{\text{s}}$

– introduire les valeurs et calculer $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{0{,}15 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-11}}}$

$f_o = \mathbf{613\ kHz}$

Deuxième étape : calcul de la qualité Q du circuit

– écrire la formule de base $Q = \frac{\omega_o L}{R}$; $[Q] = \frac{\text{Vs} \cdot \text{A}}{\text{s} \cdot \text{A} \cdot \text{V}} = 1$

– introduire les valeurs et calculer $Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0{,}613 \cdot 10^6 \cdot 0{,}15 \cdot 10^{-3}}{5}$

$Q = \mathbf{116}$

Troisième étape : calcul de la largeur de bande b

– écrire la formule de base $b = \frac{f_o}{Q}$

– introduire les valeurs et calculer $b = \frac{613 \cdot 10}{116}$

$b = \mathbf{5{,}28\ kHz}$

b. Calculer et dessiner la courbe de résonance

Calculer le circuit oscillant série de la figure 237. Représenter les résultats sous la forme graphique d'une courbe de résonance.

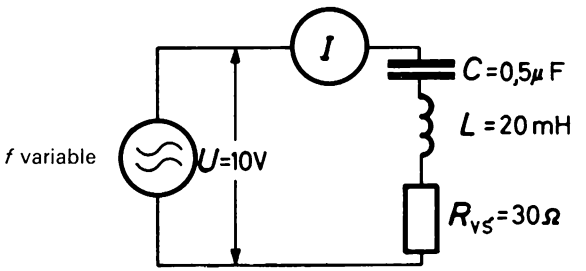


Figure 237

Marche à suivre:

Première étape: calcul de la fréquence de résonance

– écrire la formule de base $f_o = \dfrac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}}$

– introduire les valeurs et calculer $f_o = \dfrac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{20 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}}$

$f_o =$ **1591 Hz**

Deuxième étape: calcul de la courbe de résonance

Etablir un tableau en y reportant les valeurs suivantes:

– réactance capacitive (capacitance)
– réactance inductive (inductance)
– réactance effective totale
– impédance du circuit
– courant dans le circuit

Le calcul doit englober une gamme de fréquence allant de 1100 Hz à 2100 Hz.

Calculer les valeurs tous les 100 Hz.

– écrire la formule de X_L : $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$

– introduire les valeurs et calculer (f = 1100 Hz) :

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot 1{,}1 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-3}$$

$$[X_L] = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A}$$

$$X_L = \mathbf{138{,}2}\ \Omega$$

– écrire la formule de base de X_C : $X_C = \dfrac{1}{\omega C}$

– introduire les valeurs et calculer (f = 1100 Hz) :

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1{,}1 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-7}}$$

$$[X_C] = s \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A}$$

$$X_C = \mathbf{289{,}4}\ \Omega$$

– écrire la formule de base de l'impédance du circuit : $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

– introduire les valeurs et calculer :

$$Z = \sqrt{30^2 + 151{,}2^2}$$

$$Z = \mathbf{154{,}2}\ \Omega$$

Ces calculs seront poursuivis pour chacune des fréquences requises du spectre. Pour effectuer les calculs rationnellement, calculer d'abord toutes les inductances puis toutes les capacitances ensuite toutes les valeurs des différences des réactances et enfin toutes les impédances. Les résultats sont exposés sur le tableau 16.

f (Hz)	$X_L(\Omega)$	$X_C(\Omega)$	$X_L - X_C$ (Ω)	$X_C - X_L$ (Ω)	Z (Ω)	I (mA)
1100	138,2	289,4		151,2	154,2	64,8
1200	150,8	265,3		114,5	118,4	84,4
1300	163,4	244,9		81,5	86,8	115,2
1400	175,9	227,4		51,5	59,6	167,8
1500	188,5	212,2		23,7	38,2	262,3
1600	201,1	198,9	2,2		30,1	332,5
1700	213,6	187,2	26,4		40,0	250,0
1800	226,5	176,8	49,7		56,0	172,5
1900	238,8	167,5	71,3		77,4	129,2
2000	251,3	159,2	92,1		96,9	103,5
2100	263,9	151,6	112,3		116,2	86,1

Tableau 16

Troisième étape : dessiner les courbes des réactances en fonction de la fréquence

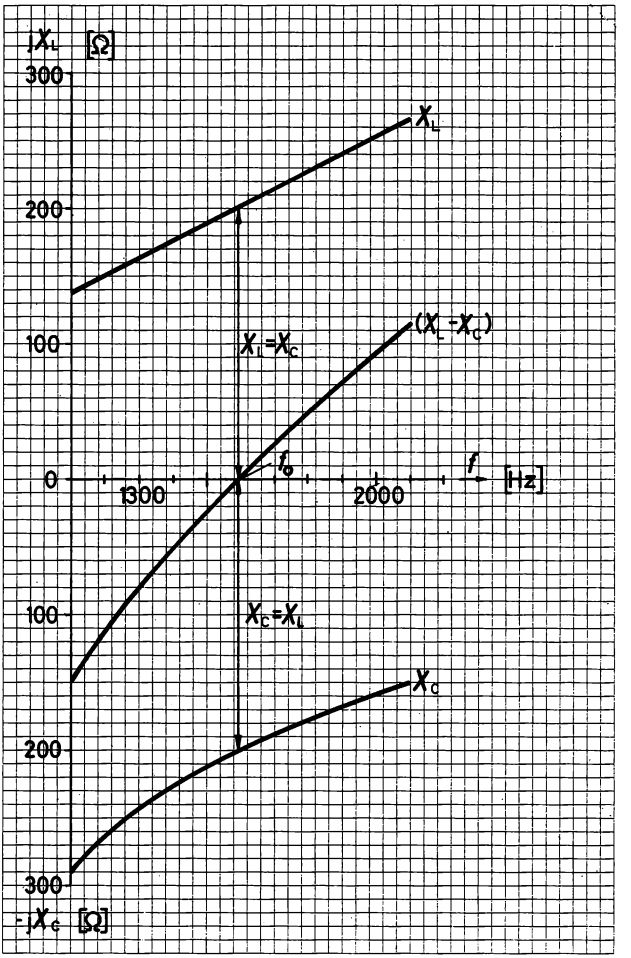


Figure 238

Quatrième étape : dessiner les courbes de résonance, déterminer la largeur de bande.

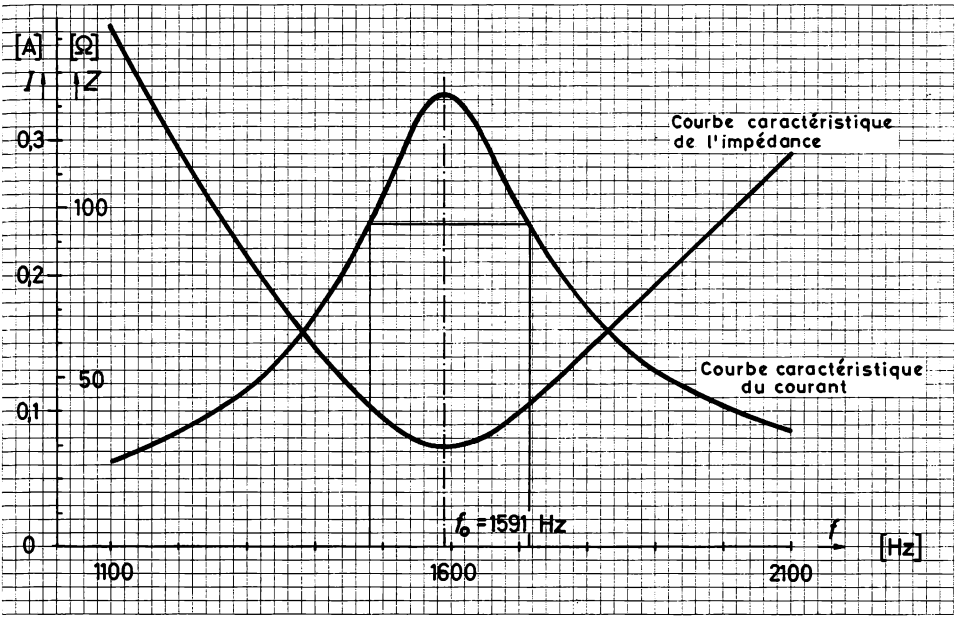


Figure 239

Vérification de la largeur de bande par le calcul :

– écrire la formule de base du calcul de Q $\quad Q = \dfrac{\omega_o L}{R_{vs}}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad Q = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot 1591 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{30}$

$Q = 6{,}66$

– écrire la formule du calcul de b $\quad b = \dfrac{f_o}{Q}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad b = \dfrac{1591}{6{,}66}$

$b = 238{,}8$ Hz

Les courbes de l'impédance et du courant n'ont pas un tracé symétrique par rapport à la fréquence de résonance. La cause de cette asymétrie réside dans le fait que les courbes caractéristiques des réactances de la bobine et du condensateur ont un tracé différent en fonction de la fréquence.

Pour les circuits haute fréquence, cette asymétrie peut être négligée car là, les circuits étant d'une qualité très élevée, il s'ensuit que la largeur de bande est remarquablement plus petite (étroite). La courbe de la capacitance du condensateur peut être admise comme linéaire dans la gamme étroite intéressée et de ce fait la courbe de résonance présente une caractéristique symétrique.

5. L'essentiel

Le circuit oscillant série consiste en une capacité et une inductance reliées en série. Lors du calcul du circuit, les pertes totales du circuit oscillant se résument à une résistance de pertes série.
La fréquence pour laquelle la réactance d'induction et la réactance capacitive sont égales se nomme fréquence de résonance.
La fréquence de résonance se calcule à l'aide de la formule de Thomson. Cette formule contient, sous forme algébrique, la condition de résonance qui exige que dans ce cas l'inductance et la capacitance soient d'égale valeur.
A la résonance, le circuit série se comporte comme une résistance pure dont la valeur est celle des résistances de pertes série. Au-dessus de la fréquence de résonance, le circuit est inductif, au-dessous il est capacitif.
Le comportement du circuit est représenté par la courbe de résonance.
La qualité du circuit correspond, en pratique, à la qualité de la bobine car les pertes dans le condensateur étant très faibles sont négligeables.
La largeur de bande du circuit s'appelle : bande passante. Celle-ci est mesurée entre deux points de la courbe de résonance pour lesquels le courant s'est abaissé à $1/\sqrt{2}$ dans le circuit oscillant.
La largeur de bande (ou bande passante) dépend de la qualité du circuit et de la fréquence de résonance. Le quotient résultant de la fréquence de résonance par la qualité du circuit donne la valeur de la bande passante ($b = \frac{f_o}{Q}$).

6. Exercices de répétition (solutions page 471)

a) Expliquez pourquoi un circuit oscillant en résonance se comporte comme une résistance ohmique.
b) Déduisez la formule de Thomson des conditions régissant la résonance du circuit oscillant.
c) Pour le circuit de la figure 240, calculez la capacité, la qualité du circuit et la largeur de bande.

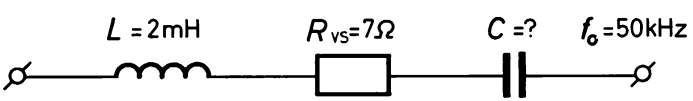


Figure 240

d) La largeur de bande d'un circuit oscillant est de 2 kHz, la qualité du circuit est de 100, la résistance de pertes série a une valeur de 4 ohms. Calculez la capacité du circuit oscillant.
e) Dessiner le diagramme vectoriel d'un circuit oscillant en résonance ayant une qualité de circuit $Q = 5$ avec les proportions exactes.
f) Pourquoi la qualité du circuit est-elle pratiquement identique à celle de la bobine?
g) La largeur de bande donne-t-elle une indication de la qualité du circuit?

VIII. Le circuit oscillant parallèle

1. Introduction

Le circuit oscillant parallèle se différencie du circuit série par sa disposition et son comportement électrique. Pourtant il se compose des mêmes éléments : une bobine et un condensateur. Le circuit parallèle se rencontre bien plus souvent que le circuit série. Avec le circuit parallèle, nous disposons d'un moyen de sélection typique. Grâce à lui, des fréquences bien précises sont prélevées dans un spectre de fréquences. Puisque le circuit série en résonance présente une très faible résistance ohmique, il est souvent utilisé pour supprimer des fréquences indésirables. Le circuit parallèle possède un comportement exactement inverse, lorsqu'il entre en résonance il a une résistance ohmique très élevée. La condition régissant la résonance est, par contre, la même pour les deux sortes de circuits oscillants.

2. Que savez-vous au sujet du circuit oscillant parallèle ? (solutions page 474)

a) Comment un circuit oscillant parallèle est-il monté ?
b) La qualité de la bobine joue-t-elle un rôle en ce qui concerne la qualité du circuit oscillant parallèle ?
c) La formule de Thomson pour le circuit oscillant série est-elle aussi valable pour le circuit parallèle ?
d) Connaissez-vous un domaine d'utilisation du circuit oscillant parallèle ?
e) La largeur de bande d'un circuit oscillant parallèle est-elle influencée par la qualité de la bobine ?

3. Le circuit oscillant parallèle

a. Montage du circuit oscillant parallèle

Le *circuit oscillant parallèle* se compose d'une bobine et d'un condensateur reliés en parallèle. Toutes les pertes dans le circuit sont réunies en une *résistance de perte parallèle.* Cette dernière est provoquée par la conversion d'un circuit série en un circuit parallèle et là, les pertes de la bobine considérées au point de vue physique se présentent toujours comme des résistances de perte série. Les développements mathématiques nécessaires pour convertir une résistance de perte série en une résistance de perte parallèle sortiraient du cadre de cet ouvrage. Les considérations fondamentales qui y mènent doivent, cependant, être exposées brièvement :

- Les pertes dans la bobine sont par essence des *pertes série*, celles-ci se manifestent comme si une résistance était en série avec l'inductance selon le schéma de gauche de la figure 241.
- Lors du traitement mathématique du circuit oscillant parallèle, les pertes dans le circuit devraient être considérées comme une *résistance de perte parallèle* et alors, le calcul comme la représentation graphique se simplifient considérablement.

– Il s'agit maintenant de convertir une inductance, avec des pertes série, en une inductance ayant des pertes en parallèle. Les deux schémas de la figure 241 doivent être de même valeur.

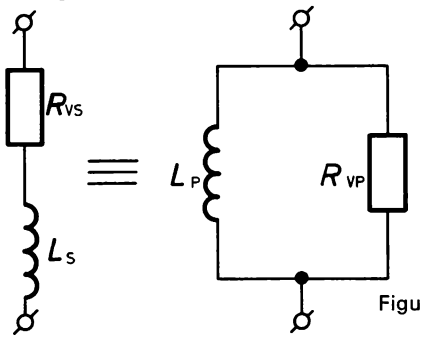


Figure 241

La transformation mathématique suivante est possible :

$$R_{VP} = \frac{R_{VS}^2 + (\omega L_S)^2}{R_{VS}} = R_{VS}[1 + (\frac{\omega L_S}{R_{VS}})^2]$$

$$\omega L_P = \frac{R_{VS}^2 + (\omega L_S)^2}{\omega L_S} = L_S[1 + (\frac{R_{VS}}{\omega L_S})^2]$$

– *Le circuit parallèle doit présenter la même impédance et le même déphasage que le circuit série mais avec une inversion du signe* ($\frac{1}{j} = -j$).

Cette exigence ne peut être remplie que lorsque l'inductance et la résistance de perte du circuit parallèle sont remplacées par celles du circuit série.

– Pratiquement, dans le domaine des qualités de bobine au-dessus de 20, la variation d'inductance est si faible qu'elle peut être négligée.
– Nous nous apercevons de ce qui suit :
Plus la résistance de perte série d'une bobine est faible d'autant plus grande sera la résistance de perte parallèle.
– Pour le circuit parallèle, la qualité de la bobine s'exprime par :

$$Q_L = \frac{R_{vp}}{X_{LP}} \quad (R_{vp} = \text{Résistance de perte parallèle})$$

Pour les considérations suivantes nous utiliserons le circuit oscillant parallèle, avec sa résistance de perte parallèle, comme le montre la figure 242.

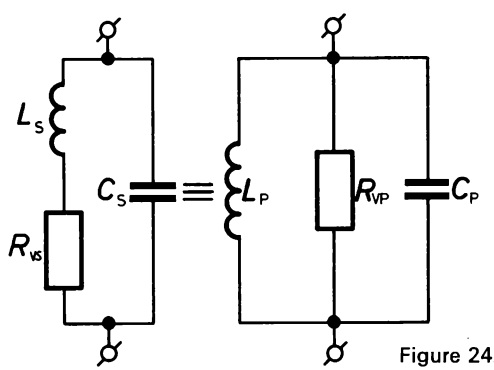


Figure 242

A la fréquence de résonance, la transformation suivante est possible :

$$f_o = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L_S C_S} - (\frac{R_{VS}}{L_S})^2}$$

$$L_P \approx L_S$$

$$C_P = C_S$$

$$R_{VP} > R_{VS}$$

$$Q = \frac{X_{LS}}{R_{VS}} = \frac{R_{VP}}{X_{LP}}$$

b. L'oscillation amortie

L'*oscillation amortie* est une oscillation dont l'amplitude décroît. Un pendule, mis en marche, oscille avec une élongation qui va en diminuant par suite des pertes par frottement, il produit donc une oscillation amortie.

Un circuit oscillant excité est également le siège d'une oscillation amortie. Le processus suivant montre la production d'une oscillation amortie :

– Le condensateur de la figure 243 est chargé au moyen d'une source de tension B. En basculant le commutateur S, le champ électrique accumulé dans le condensateur provoque l'écoulement d'un courant qui crée un champ magnétique dans la bobine. Pendant la décharge du condensateur son champ électrique diminue et passe par la valeur zéro. L'énergie électrique emmagasinée dans le condensateur s'est transformée en énergie magnétique dans la bobine. A ce moment, par suite de la diminution simultanée du champ électrique dans le condensateur et de l'écoulement du courant, le champ magnétique de la bobine diminue également, ce qui a pour effet de créer une tension induite qui charge le condensateur avec une polarité inverse.

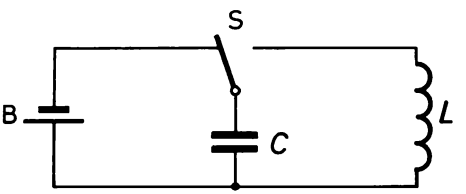


Figure 243

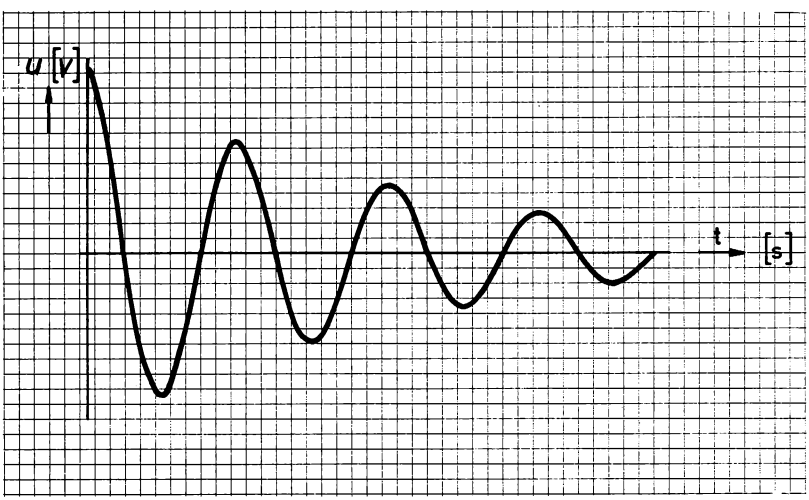


Figure 244

L'énergie magnétique de la bobine est transférée au condensateur sous forme de charge électrique. Dans un circuit oscillant sans perte, cet échange d'énergie se répéterait indéfiniment : le circuit oscillerait continuellement. Un tel circuit pourrait être comparé avec un pendule qui ne présenterait aucune perte par frottement. Lorsque le pendule serait mis en mouvement il continuerait d'osciller indéfiniment. Mais, puisque dans chaque circuit oscillant des pertes sont présentes, sous forme de résistance ohmique, une puissance est continuellement transformée en chaleur, pendant l'échange d'énergie, par le courant qui s'écoule à travers la résistance de perte. Il s'ensuit que les oscillations diminuent et nous obtenons une oscillation amortie telle que celle de la figure 244.

Dans le circuit, la conversion d'énergie nécessite un certain temps. Plus le condensateur et la bobine sont grands d'autant plus lente sera la décroissance de l'oscillation. Cette constatation concorde avec la formule de Thomson qui est aussi valable pour le circuit oscillant parallèle.

L'expérience suivante montre la production d'une onde amortie. La figure 245 en indique le schéma et la figure 246 le montage.

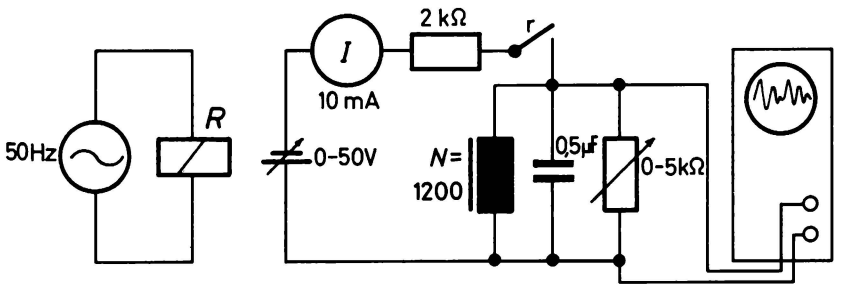


Figure 245

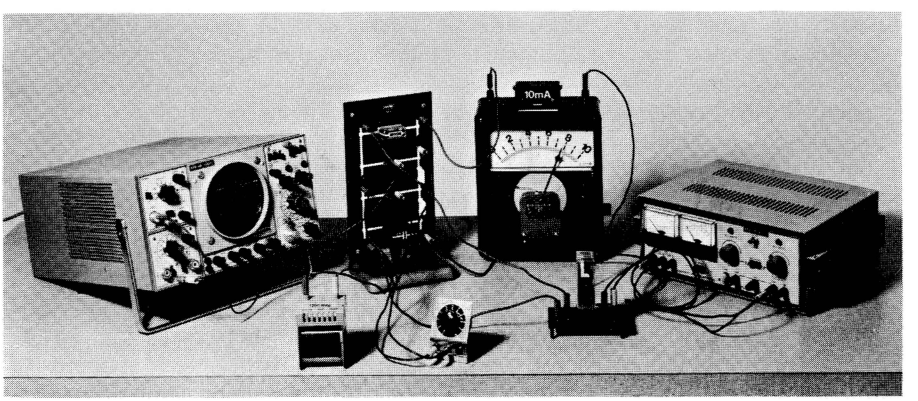


Figure 246

Le circuit de mesure est excité périodiquement, par la source de tension, à travers le contact du relais r. La qualité du circuit est variée par un potentiomètre de 5 k-ohms. L'oscillation amortie apparaît sur l'écran de l'oscilloscope. Le réglage du potentiomètre permet de rendre visible l'influence de la qualité du circuit sur le processus oscillatoire.
Ce qui se passe dans le circuit oscillant peut se visualiser au moyen d'un modèle mécanique dont la figure 247 en montre l'esquisse.

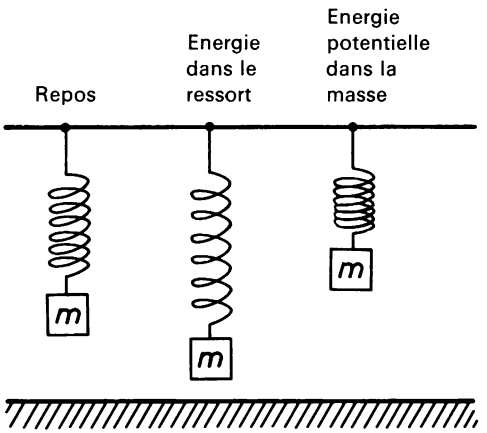


Figure 247

Un ressort hélicoïdal est fixé au plafond de la chambre. Une masse en plomb est attachée à son autre extrémité. La longueur du ressort est mesurée de façon telle, qu'au repos la masse se situe à mi-hauteur de celle de la chambre. La masse en plomb est alors tirée vers le sol ce qui a pour effet de tendre le ressort. Le travail fourni pour tirer la masse vers le bas est maintenant emmagasiné, sous forme d'énergie, dans le ressort tendu. Dans cet exemple, le ressort assume le rôle du condensateur chargé. Aussitôt que la masse est libérée elle est ramenée vers le haut et au moment où elle atteint son point le plus élevé, le ressort est complètement détendu. Toute l'énergie se trouve à cet instant, sous forme d'énergie potentielle dans la masse de plomb. L'inductance est représentée par la masse, qui correspond à l'énergie potentielle emmagasinée dans le champ magnétique. Puis la masse retombe vers le sol, le ressort est à nouveau tendu et l'énergie potentielle se convertit, pendant la chute, en énergie dans le ressort. Le processus oscillatoire continuerait indéfiniment si les pertes par frottement n'existaient pas. Les oscillations diminuent d'autant plus rapidement que les pertes par frottement sont élevées. Les pertes provoquées par le frottement peuvent se comparer avec les pertes ohmiques dans le circuit oscillant, les deux sortes de pertes sont la cause d'un amortissement des oscillations.

c. Le comportement du circuit oscillant parallèle

Ce comportement est étudié au moyen de l'expérience suivante. Le schéma est donné par la figure 248 et le montage de l'essai par la figure 249.

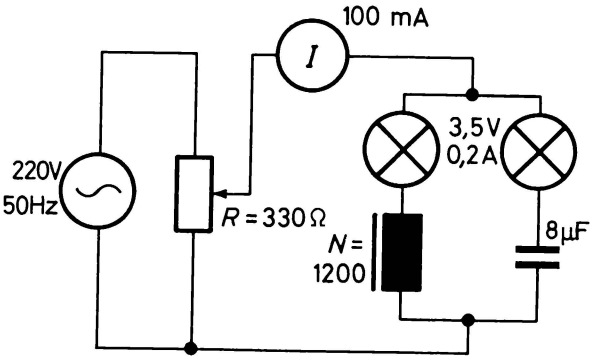


Figure 248

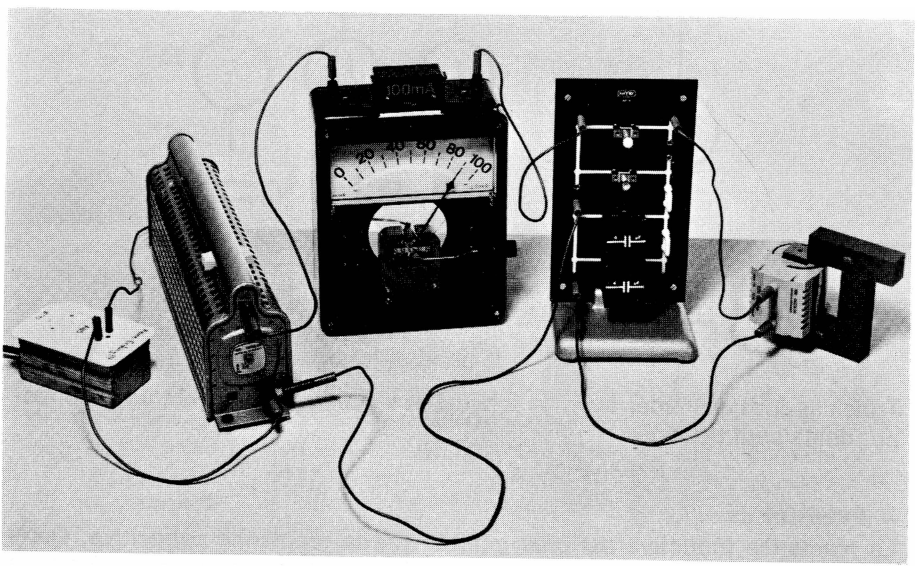


Figure 249

L'inductance de la bobine est portée à sa valeur maximale en fermant complètement le circuit magnétique avec l'armature. La tension appliquée aux bornes du circuit est élevée, au moyen de la résistance variable, jusqu'à ce que le courant atteigne 100 mA. Simultanément, la lampe dans le circuit du condensateur commence à éclairer alors que celle, dans le circuit de la bobine, reste sombre. Maintenant, l'inductance de la bobine est lentement diminuée en retirant l'armature. La lampe, dans le circuit de la bobine commence également à s'illuminer. Pour une position déterminée de l'armature, les deux lampes ont une intensité lumineuse égale et simultanément, le courant dans le circuit atteint sa valeur la plus faible. Si l'inductance est encore diminuée, le courant dans le circuit augmente de nouveau.
Il convient de considérer le résultat de l'expérience à l'aide du diagramme vectoriel. Pour ce faire, le schéma du circuit équivalent est dessiné. Toutes les pertes sont réunies en une résistance de perte parallèle. Il s'agit ici, en principe, du circuit parallèle déjà connu composé de résistances effectives et de réactances. La figure 250 montre le schéma équivalent.

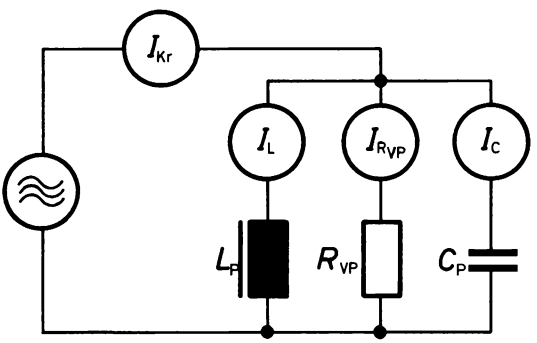


Figure 250

Trois cas sont examinés avec ce schéma et les diagrammes vectoriels correspondants sont dessinés.

– Premier cas

La réactance inductive est *plus grande* que la réactance capacitive. Cette situation est celle qui a été réalisée au début de notre expérience. Le circuit se comporte comme une capacité (il est capacitif).

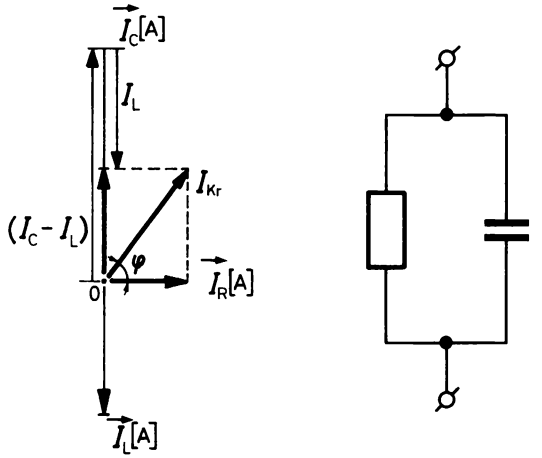


Figure 251

– Deuxième cas

La réactance inductive est *plus petite* que la capacitance. Ce cas correspond à la situation de la fin de notre expérience. Le circuit est inductif.

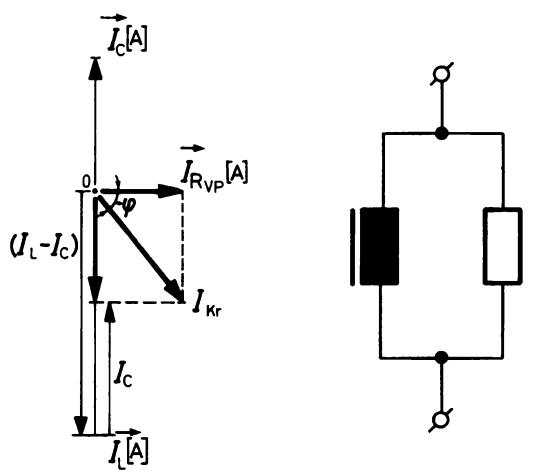


Figure 252

– Troisième cas

Les réactances de capacité (capacitance) et d'induction (inductance) *sont égales.* Ce cas correspond à la phase de notre expérience où les lampes brillaient avec la même intensité et où le courant dans le circuit était à sa valeur minimale. Le circuit se comporte comme une résistance ohmique.

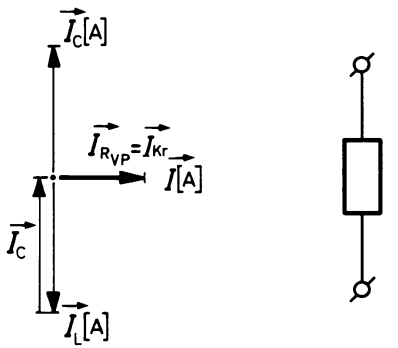


Figure 253

Les courants capacitif et réactif sont en opposition de phase et par conséquent ils s'annulent mutuellement. Pour que les courants réactifs soient de mêmes valeurs, les réactances doivent donc être égales. Dans ce cas, seule la résistance de perte parallèle est active. L'expérience suivante permet de corroborer les essais déjà effectués. La figure 254 en indique le schéma et la figure 255 montre le montage de l'essai.

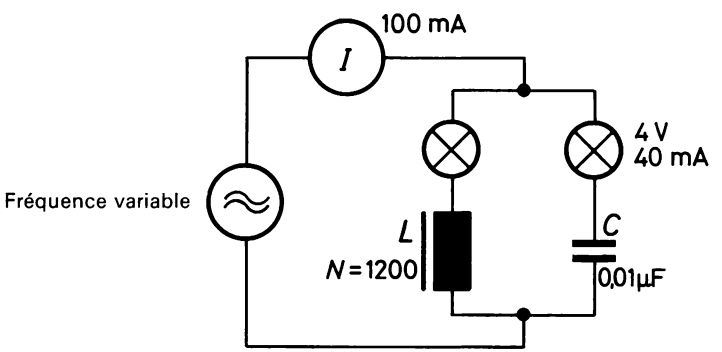


Figure 254

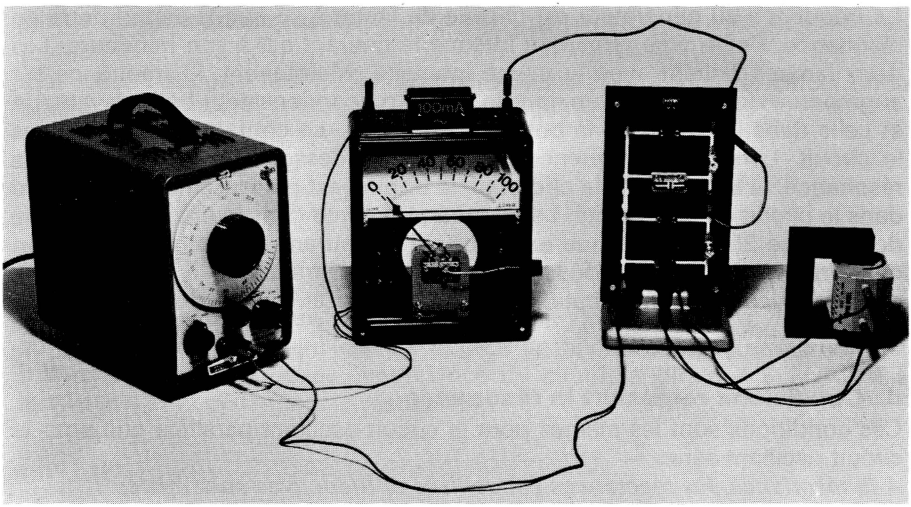


Figure 255

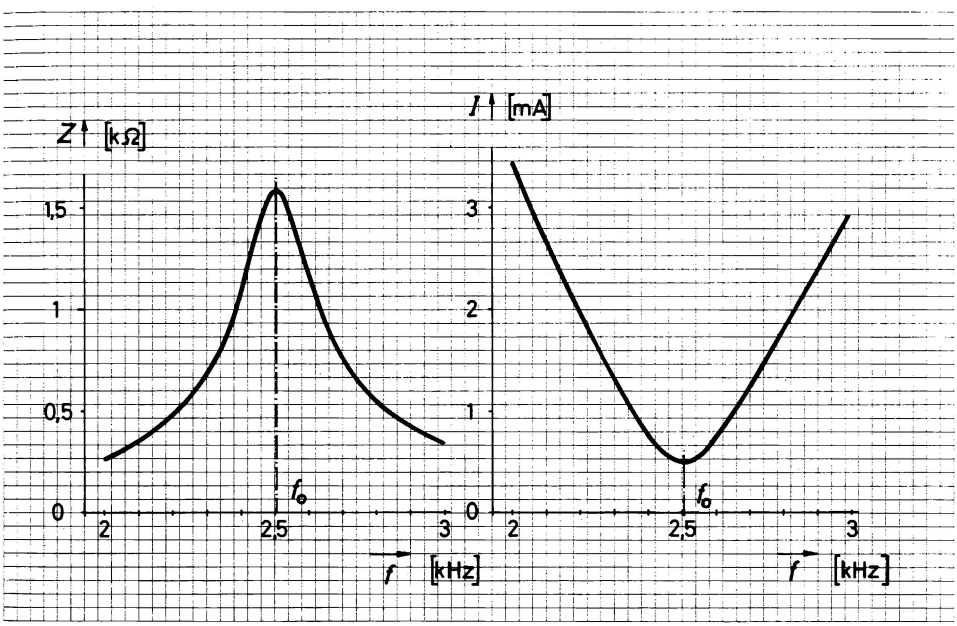


Figure 256

La fréquence du générateur est choisie de façon à ce que le circuit entre en résonance. Celle-ci se remarque lorsque le courant est à son minimum. Les deux lampes brillent avec la même intensité. Maintenant, la fréquence est augmentée : la lampe témoin dans le circuit du condensateur brille davantage et celle dans le circuit de la bobine s'assombrit. Le courant augmente dans le circuit. Lorsque la fréquence est réglée au-dessous de la fréquence de résonance, la lampe dans le circuit de la bobine est plus lumineuse que celle dans le circuit de la capacité. Le courant augmente dans le circuit. La courbe de la figure 256 est obtenue en reportant le courant du circuit en fonction de la fréquence. On peut déduire la courbe de l'impédance à partir de cette courbe du courant en calculant l'impédance du circuit pour chaque valeur de la fréquence.

d. Conditions régissant la résonance

Ces conditions sont les mêmes pour le circuit oscillant parallèle que pour le circuit oscillant série.
A la résonance, les réactances capacitives et inductives sont égales.

$$X_L = X_C$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

La formule de Thomson est également valable pour le circuit oscillant parallèle.
Cette constatation est quelque peu restrictive et n'est valable que pour des circuits dont le facteur de qualité est légèrement au-dessus de 20. Pour des facteurs de qualité de circuit plus faibles il faudrait tenir compte de l'influence de la résistance de perte. En pratique, les circuits couramment employés ont un facteur de qualité plus élevé d'où il s'ensuit que la formule de Thomson peut leur être appliquée.

e. La courbe de résonance

La présentation graphique de la dernière expérience donne de nouveau la courbe de résonance. Dans le travail pratique, l'allure de la courbe de l'impédance est de première importance. La courbe de gauche de la figure 256 montre le tracé de l'impédance d'un circuit oscillant parallèle.
Le tracé (ou l'allure) de la courbe dépend des propriétés du circuit oscillant. A l'inverse du circuit série, le circuit parallèle présente la plus grande impédance à la résonance. A la fréquence de résonance, le circuit parallèle représente aussi une résistance pure. Le circuit parallèle est utilisé partout *là où il est nécessaire de prélever une fréquence bien précise dans un spectre de fréquences.* Il se comporte comme un filtre coloré en photographie, par exemple un filtre rouge ne laissant passer que la lumière rouge du spectre lumineux ou autrement dit, la longueur d'onde qui correspond au rouge.

f. La qualité du circuit Q

Le facteur de qualité d'un circuit parallèle a la même signification que celui d'un circuit série. Il faut cependant faire observer que, pour le calcul de la qualité, la résistance de perte parallèle se trouve au numérateur.

$$Q = \frac{R_{vp}}{\omega_o L_P} \quad d = \frac{1}{Q} \qquad R_{vp} = \text{Résistance de perte parallèle}$$

g. La largeur de bande b

La largeur de bande (ou bande passante) *b* a la même signification pour le circuit parallèle que pour le circuit série. La figure 257 montre les relations concernant le circuit parallèle. La largeur de bande est mesurée aux deux fréquences pour lesquelles l'impédance du circuit a diminué à $1/\sqrt{2}$ fois la valeur de l'impédance à la résonance.

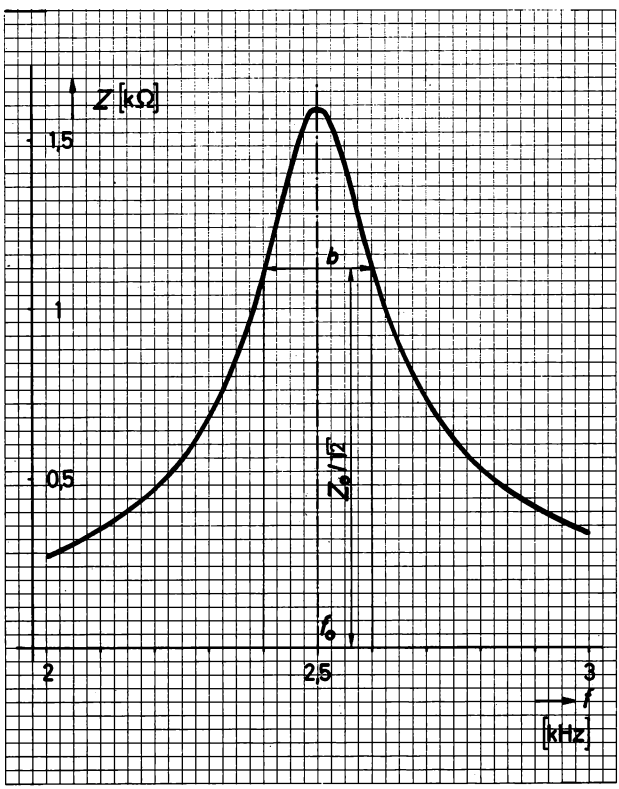


Figure 257

4. Exemples

a. Calcul de la fréquence, de la qualité du circuit et de la largeur de bande

Calculer le circuit oscillant de la figure 258. Les valeurs suivantes sont connues :

- $L = 150\ \mu H$
- $C = 300\ pF$
- $R = 120\ k\Omega$

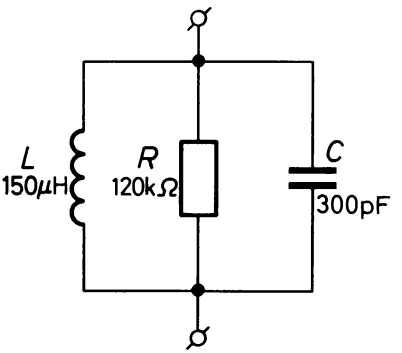


Figure 258

Marche à suivre:

Première étape : calcul de la fréquence de résonance f_o

- écrire la formule de base

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

$$[f_o] = \frac{1}{\sqrt{\frac{Vs}{A} \cdot \frac{As}{V}}} = \frac{1}{s} = Hz$$

- introduire les valeurs et calculer

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{150 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f_o = \mathbf{750{,}3\ kHz}$$

Deuxième étape : calcul de la qualité du circuit

- écrire la formule de base

$$Q = \frac{R_{vp}}{X_L};\ [\Omega] = \frac{V}{A} \cdot s \cdot \frac{A}{Vs} = 1$$

- introduire les valeurs et calculer

$$Q = \frac{120 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}7503 \cdot 10^6 \cdot 150 \cdot 10^{-6}}$$

$$Q = \mathbf{169{,}7}$$

Troisième étape : calcul de la largeur de bande

– écrire la formule de base $b = \frac{f_o}{Q}$

– introduire les valeurs et calculer $b = \frac{750{,}3 \cdot 10^3}{169{,}7}$

$b = \mathbf{4{,}42\ kHz}$

b. Calcul et tracé de la courbe de résonance

Le circuit oscillant parallèle de la figure 259 doit être calculé en admettant que la qualité du circuit Q = 6,66. Dessiner la courbe de résonance.

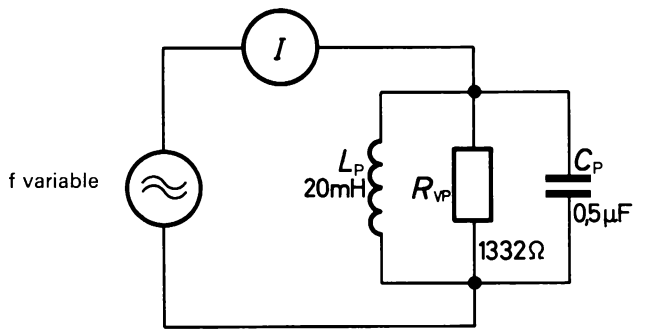


Figure 259

Marche à suivre:

Première étape : calcul de la fréquence de résonance

– écrire la formule de base $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$

– introduire les valeurs et calculer $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{20 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}}$

$f_o = \mathbf{1591\ Hz}$

Deuxième étape : calcul de la courbe de résonance

Etablir un tableau tenant compte des valeurs suivantes :
– conductance réactive ou susceptance
– conductance capacitive ou susceptance
– conductance réelle
– impédance du circuit

Effectuer les calculs pour la gamme de 1100 Hz à 2100 Hz, tous les 100 Hz.

– écrire les formules de base pour l'ensemble des calculs

$$B_L = \frac{1}{\omega L}$$

$$B_C = \omega C$$

$$G = \frac{1}{R_{vp}}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}}$$

– introduire les valeurs et faire les calculs pour toutes les fréquences (tous les 100 Hz).
Seule la première fréquence (1100 Hz) est prise comme exemple de calcul.

$$B_L = \frac{1}{2\pi\, 1100 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}$$

$$B_L = \mathbf{7{,}23 \cdot 10^{-3}\ S}$$

$$B_C = 2\pi \cdot 1{,}1 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$$

$$B_C = \mathbf{3{,}45 \cdot 10^{-3}\ S}$$

$$G = \frac{1}{1332}$$

$$G = \mathbf{0{,}751 \cdot 10^{-3}\ S}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{0{,}751^2 \cdot 10^{-6} + 3{,}78^2 \cdot 10^{-6}}}$$

$$Z = \mathbf{259\ \Omega}$$

f (Hz)	B_L (10^{-3} S)	B_C (10^{-3} S)	$B_L - B_C$ (10^{-3} S)	$B_C - B_L$ (10^{-3} S)	Z (Ω)
1100	7,23	3,45	3,78		259
1200	6,63	3,77	2,86		338
1300	6,12	4,08	2,04		461
1400	5,68	4,40	1,28		674
1500	5,30	4,71	0,59		1047
1600	4,97	5,03		0,05	1328
1700	4,68	5,34		0,66	1000
1800	4,41	5,65		1,24	690
1900	4,19	5,97		1,78	517
2000	3,98	6,28		2,30	413
2100	3,79	6,59		2,80	344

Tableau 17

Troisième étape : dessiner la courbe de résonance

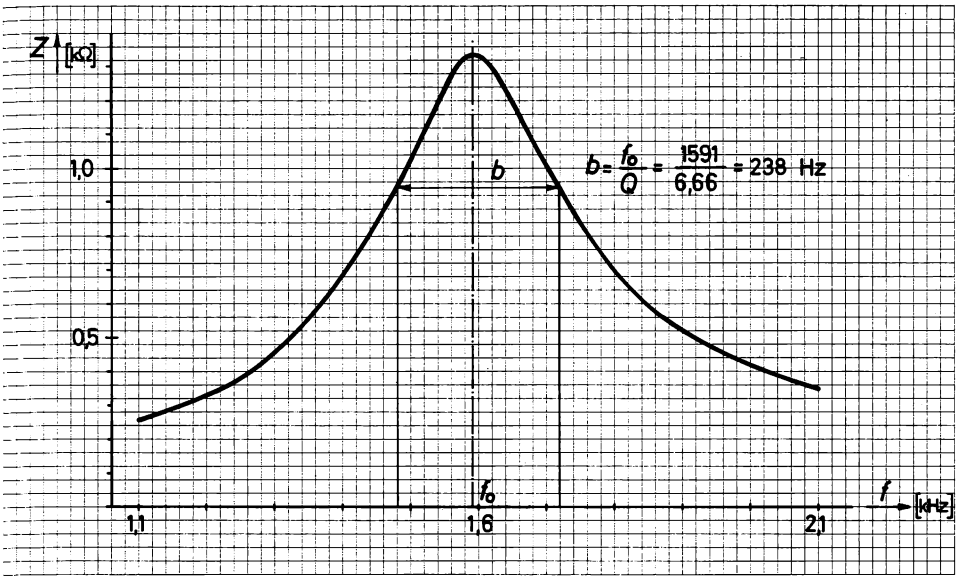


Figure 260

Les causes de la dissymétrie de la courbe de résonance sont les mêmes que celles qui ont été déjà données pour le circuit série (voir page 279).

c. Calcul de l'impédance, de la largeur de bande et des courants d'un circuit résonnant parallèle

Selon le schéma de la figure 261, calculer les caractéristiques du circuit en admettant que sa qualité $Q = 120$:
Impédance à la résonance Z_o, largeur de bande b, courants I_R, I_C et I_L à la résonance.

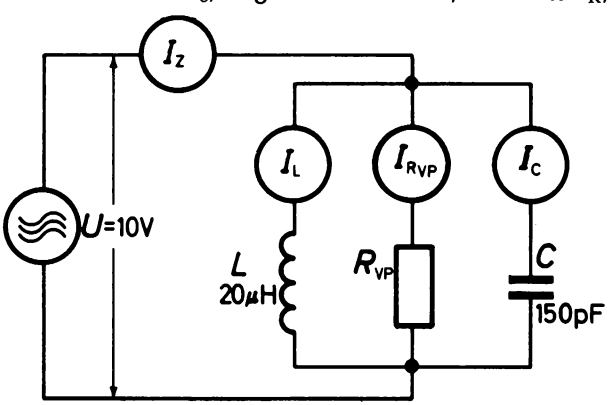


Figure 261

Marche à suivre:
Première étape: calcul de la fréquence de résonance

– écrire la formule de base

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$$

$$[f_o] = \frac{1}{\sqrt{\frac{Vs}{A} \cdot \frac{As}{V}}} = \frac{1}{s} = Hz$$

– introduire les valeurs et calculer

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{20 \cdot 10^{-6} \cdot 150 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f_o = 2{,}9 \text{ MHz}$$

Deuxième étape: calcul de X_L et X_C

– écrire la formule de base régissant la résonance

$$X_L = X_C = \omega_o L$$

– introduire les valeurs et calculer

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot 2{,}9 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-6}$$

$$X_L = 365\ \Omega$$

Troisième étape: calcul de Z_o

– écrire la formule de base du facteur de qualité Q

$$Q = \frac{R_{vp}}{X_L}$$

– extraire R_{vp} de la formule

$$R_{vp} = Q \cdot X_L$$

– introduire les valeurs et calculer

$$R_{vp} = 120 \cdot 365$$

$$R_{vp} = Z_o = \mathbf{43{,}8\ k\Omega}$$

Quatrième étape: calcul de la largeur de bande b

– écrire la formule de base

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$b = \frac{2{,}9 \cdot 10^6}{120}$$

$$b = \mathbf{24{,}22\ kHz}$$

Cinquième étape: calcul des courants

– écrire la formule de base de I_R

$$I_R = \frac{U}{Z_o}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$I_R = \frac{10}{43{,}8 \cdot 10^3}$$

$$I_R = \mathbf{0{,}228\ mA}$$

– écrire les formules de base de I_C et I_L $I_L = I_C = \frac{U}{X_L}$

– introduire les valeurs et calculer $I_L = \frac{10}{365}$

$I_L = \mathbf{27{,}4\ mA}$

Vérifions: le courant réactif, à travers C et L, doit être Q fois plus grand que le courant efficace (actif, watté ou en phase avec la tension) à la résonance.

$$I_R \cdot Q = I_C = I_L$$
$$0{,}228 \cdot 10^{-3} \cdot 120 = 27{,}4 \cdot 10^{-3}\ \text{A}$$

De cet exemple nous pouvons tirer les conclusions suivantes:
– à la résonance, l'impédance d'un circuit oscillant parallèle est Q fois plus grande que la réactance inductive ou que la réactance capacitive.
– à la résonance, dans le circuit oscillant parallèle le courant du circuit est Q fois plus petit que le courant réactif à travers le condensateur ou la bobine.

d. Tableau-résumé des principales formules applicables au circuit oscillant

	Circuit série	Circuit parallèle*
Formule de Thomson	$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$	$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$
Qualité du circuit	$Q = \frac{\omega_o L}{R_{vs}}$	$Q = \frac{R_{vp}}{\omega_o L}$
Amortissement	$d = \frac{1}{Q}$	$d = \frac{1}{Q}$
Largeur de bande	$b = \frac{f_o}{Q}$	$b = \frac{f_o}{Q}$
Impédance à la résonance	$Z_o = R_{vs} = \frac{\omega_o L}{Q}$	$Z_r = R_{vp} = Q\omega_o L$
Surtension à la résonance	$U_C = U_L = Q \cdot U_{Kr}$ (U_{Kr} = tension du circuit)	–
Surintensité à la résonance		$I_C = I_L = Q \cdot I_{Kr}$ (I_{Kr} = courant du circuit)

* Lorsque l'inductance est insérée en série, Q doit être plus grand que 20 sinon il faut utiliser les formules de calcul de la page 283.

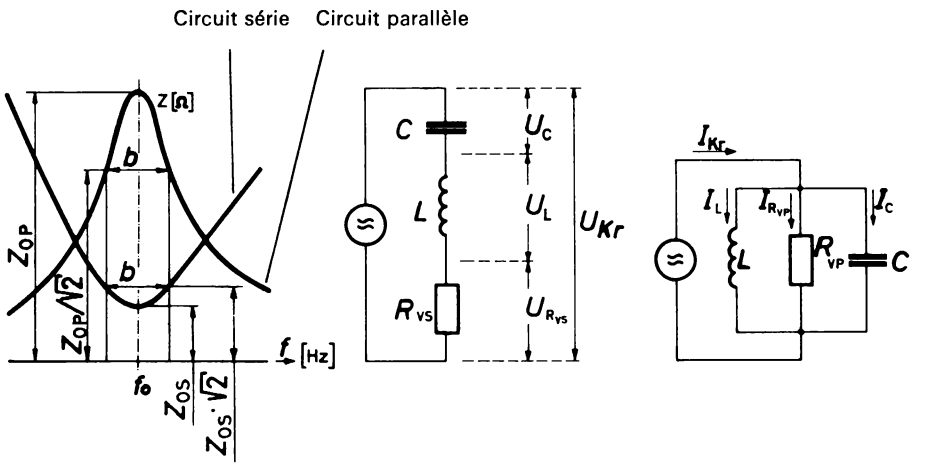


Figure 262

5. L'essentiel

Le circuit oscillant parallèle se compose d'une capacité et d'une inductance reliées en parallèle. Les pertes totales du circuit oscillant sont réunies en une résistance de perte parallèle. La fréquence pour laquelle la réactance capacitive et inductive ont la même valeur, s'appelle: fréquence de résonance. La fréquence de résonance du circuit oscillant parallèle se calcule avec la formule de Thomson.

A la résonance, le circuit oscillant parallèle se comporte comme une résistance pure dont la valeur correspond à la résistance de perte parallèle du circuit. Au-dessus de la fréquence de résonance le circuit est capacitif, au-dessous il est inductif. La qualité de la bobine du circuit oscillant détermine le facteur de qualité Q du circuit.

A la résonance, le facteur de qualité du circuit correspond au quotient de la résistance de perte parallèle par la réactance inductive (inductance).

La largeur de bande est mesurée entre deux points de la courbe de résonance pour lesquels l'impédance du circuit s'est abaissée à $1/\sqrt{2}$ fois de sa valeur à la résonance.

A la résonance, l'impédance du circuit est Q fois plus grande que sa réactance capacitive ou inductive.

Les circuits oscillants parallèles sont employés partout là où une fréquence bien déterminée doit être prélevée (filtrée) dans un spectre de fréquences.

6. Exercices de répétition (solutions page 474)

a) Quelle différence de comportement y a-t-il entre un circuit oscillant série et un circuit oscillant parallèle ?
b) Définissez la qualité d'un circuit parallèle.
c) Dessinez, à une échelle correcte, le diagramme vectoriel des conductances d'un circuit parallèle en résonance. La qualité du circuit est de 10.
d) A la fréquence de résonance, quels sont les rapports entre les courants réactifs et le courant réel dans un circuit parallèle ?
e) Un circuit parallèle est alimenté avec sa fréquence de résonance. Les deux réactances X_C et X_L sont de 1200 Ω. La qualité du circuit est de 230. Calculez la valeur de la résistance de résonance.
f) Un circuit oscillant parallèle fonctionne au-dessus de sa fréquence de résonance. Dessinez le schéma équivalent pour ce mode de fonctionnement.
g) La fréquence de résonance, mesurée, d'un circuit parallèle est de 600 kHz. La qualité du circuit est de 250. Calculez sa largeur de bande.
h) Le circuit oscillant de la figure 263 doit entrer en résonance à 2,8 MHz en y reliant le condensateur approprié.

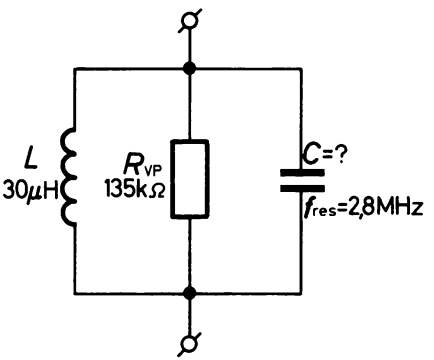


Figure 263

Quelle sera la valeur du condensateur *C* ?

IX. Les filtres de bande

1. Introduction

Nous avons vu que grâce aux circuits oscillants parallèles nous pouvons prélever une fréquence bien déterminée dans un spectre de fréquences, celle qui correspond à la fréquence de résonance du circuit. Nous savons aussi que le circuit oscillant présente une courbe de résonance caractéristique et une certaine largeur de bande. Chaque transmission d'informations, qu'elle soit diffusée par fil ou par radio, nécessite une certaine largeur de bande dans le spectre des fréquences. Cette largeur de bande dépend du genre de modulation, de la gamme des fréquences à transmettre et de la vitesse avec laquelle les signaux sont transmis. Dans un récepteur, chaque émetteur est sélectionné par des circuits oscillants. La figure 264 montre schématiquement la répartition des émetteurs dans une bande de fréquences.

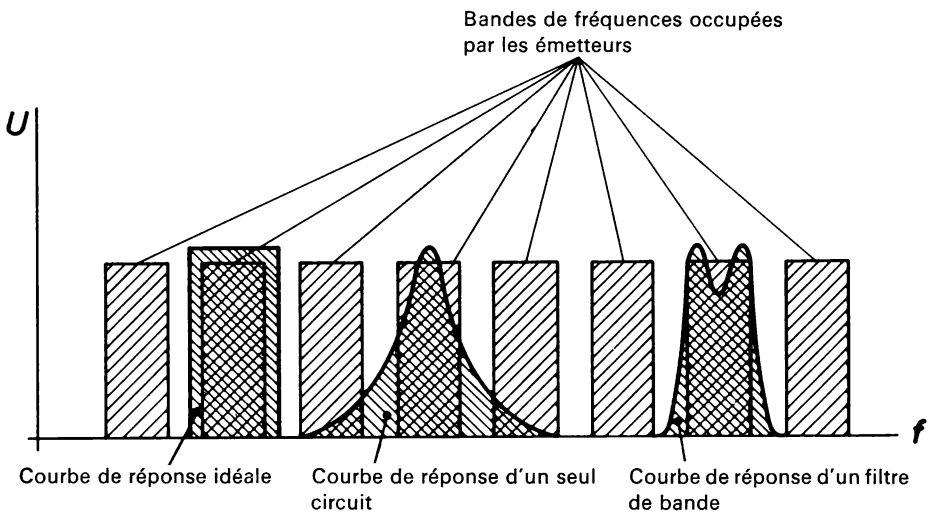


Figure 264

Les circuits oscillants ont pour fonction de prélever dans le spectre la porteuse de l'émetteur qui contient toute l'information. Nous constatons immédiatement qu'un circuit oscillant ordinaire ne peut pas remplir correctement ce rôle car sa courbe de résonance présente, ici, une forme par trop défavorable. Puisque les flancs ont une pente trop faible une partie du signal de l'émetteur adjacent est reçue. De manière à pouvoir séparer proprement les émetteurs l'un de l'autre, un moyen de sélection ayant des flancs plus raides est nécessaire.

Le composant idéal devrait présenter une courbe de réponse de forme rectangulaire. Cette courbe idéale ne peut pas être obtenue avec les moyens actuels. Cependant un simple filtre de bande procure déjà une amélioration remarquable par rapport à un circuit unique.
Les filtres de bande sont utilisés dans tous les cas où la courbe de réponse d'un seul circuit est insuffisante, par exemple dans les récepteurs de radiodiffusion, les téléviseurs, les émetteurs, les téléscripteurs, les installations de téléphonie à canaux multiples et dans la technique des mesures. Le filtre de bande le plus simple se compose de deux circuits couplés.

2. Que savez-vous au sujet des filtres de bande?
(solutions page 476)

a) Quel avantage le filtre de bande présente-t-il par rapport au circuit simple?
b) Quels sont les facteurs qui déterminent la largeur de bande du circuit simple?
c) Nommez un mode de couplage utilisé dans les filtres de bande.
d) Existe-t-il des filtres de bande comprenant plus de deux circuits simples?
e) Qu'entendez-vous par le terme « couplage inductif »?

3. Les filtres de bande

a. Données fondamentales concernant les filtres de bande

Le *filtre de bande* comporte au moins deux circuits oscillants couplés. Le *couplage* s'effectue par un élément commun aux deux circuits. En règle générale un *couplage inductif* ou *capacitif* est utilisé. Le *couplage galvanique*, à travers une résistance commune, ne se rencontre qu'exceptionnellement. Le couplage entre les circuits simples peut être ajusté très lâche ou très serré et il en résulte divers degrés de couplage. On distingue le *couplage « sous-critique », lâche, faible, critique* ou *optimum* et « *hypercritique* », serré (les termes entre guillemets ne s'emploient pas en français). Le coefficient (ou degré) de couplage influence la bande passante du filtre. Par la disposition de plusieurs circuits simples et le choix des coefficients de couplage nécessaires il est possible de réaliser des bandes passantes dont les flancs sont très raides.

b. Modes de couplage

Le couplage inductif

Lorsque des filtres de bande sont *couplés par induction*, l'énergie est transférée par le champ magnétique commun (couplage électromagnétique). Le couplage est d'autant plus fort (serré) que les inductances des circuits sont rapprochées. La figure 265 montre le principe du couplage inductif.

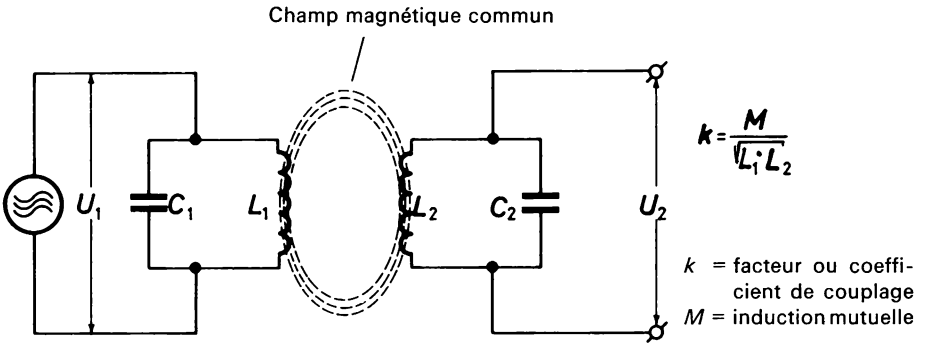


Figure 265

Dans les filtres de bande à couplage inductif, l'énergie électrique est transmise de la même manière que dans un transformateur. La différence réside uniquement dans le degré (coefficient) de couplage. Dans le transformateur, on cherche à atteindre un facteur de couplage de 100% alors que, dans un filtre de bande, selon la qualité du circuit et la largeur de bande désirée des facteurs de couplage de moins de 1% à quelques pour-cent sont courants. L'expérience suivante montre le comportement d'un filtre de bande à couplage inductif. La figure 266 en montre le schéma et la figure 267 donne la photo du montage de l'essai.

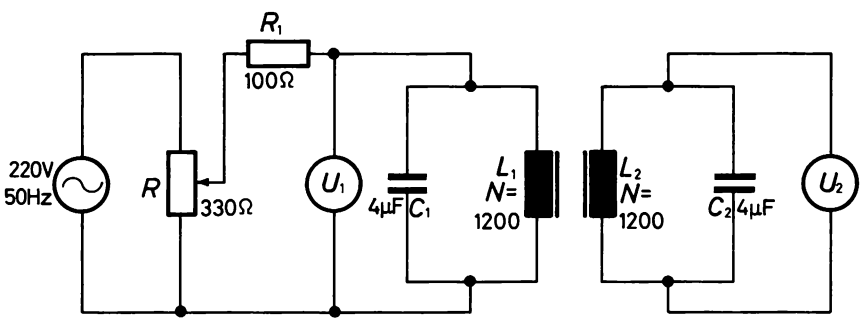


Figure 266

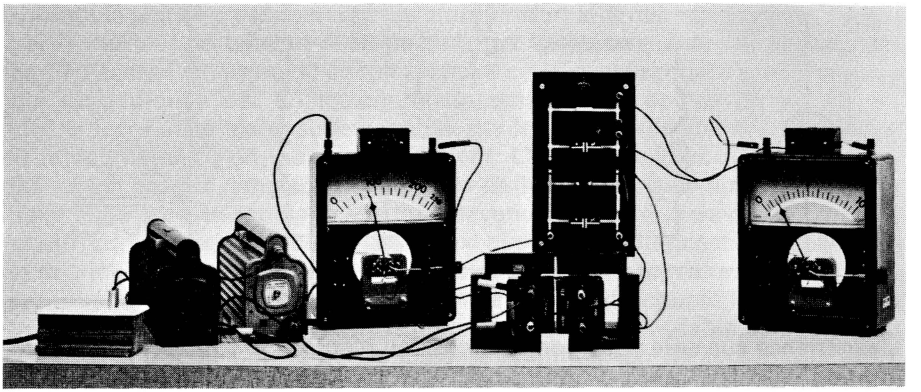


Figure 267

Une tension alternative de 50 Hz alimente le circuit primaire à travers un diviseur de tension. Le circuit primaire est accordé en déplaçant l'armature. La résonance se remarque lorsque la tension primaire est à son maximum. La résistance série R_1 découple le circuit primaire par rapport au réseau. Le circuit secondaire est également amené à la résonance en déplaçant l'armature jusqu'à ce que la tension du secondaire atteigne aussi un maximum. Puisque les deux circuits sont couplés par le champ magnétique commun, ils s'influencent l'un l'autre. Le circuit secondaire prélève de l'énergie au circuit primaire. En augmentant la distance entre le circuit primaire et le circuit secondaire, un couplage plus lâche est réalisé : la tension au circuit secondaire diminue lorsque le couplage devient plus lâche (plus faible). Ce genre de couplage des filtres de bande se rencontre très souvent dans la pratique. Les filtres sont fréquemment construits de façon à ce que l'une des bobines soit mobile permettant ainsi de varier le facteur de couplage ainsi que la forme de la bande passante.

Le couplage capacitif

Lorsque les circuits sont couplés par capacité (ou couplage électrostatique), l'énergie électrique est transférée à travers un condensateur du circuit primaire à celui du secondaire. Le couplage est d'autant plus serré que la capacité du condensateur de couplage est grande.
La figure 268 en montre le schéma.

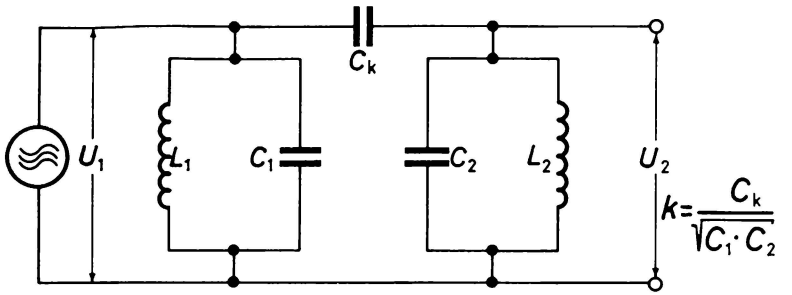
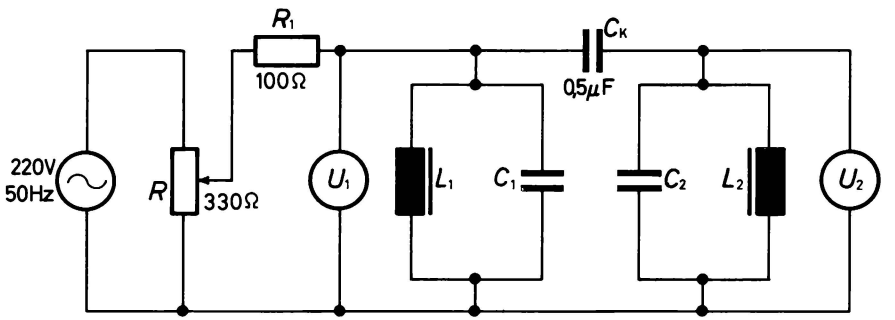


Figure 268

L'expérience suivante nous donne l'occasion d'étudier le comportement d'un filtre de bande couplé par capacité. L'essai est monté selon le schéma de la figure 269 et la figure 270 nous en indique le montage.



$L_1 = L_2$; $N = 1800$; $C_1 = C_2 = 4\mu F$

Figure 269

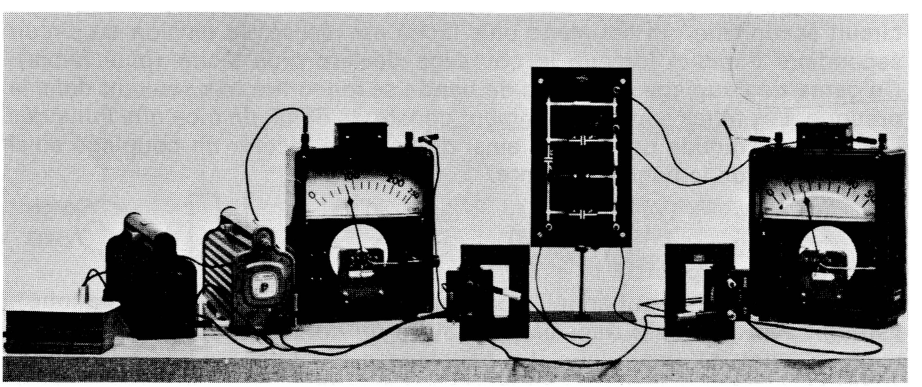


Figure 270

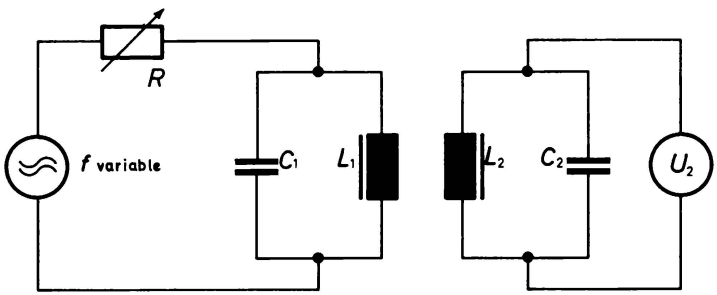
Le circuit primaire est alimenté par une tension alternative de 50 Hz, réglée par le diviseur de tension R, et passant par la résistance de découplage R_1. En déplaçant l'armature du circuit primaire celui-ci est accordé à la résonance qui est indiquée par un maximum de tension aux bornes du circuit. Le circuit secondaire est ensuite accordé, par le même procédé, à la résonance et le voltmètre U_2 en indique le moment. Le condensateur de couplage de 0,5 μF est ensuite remplacé par un autre de 1 μF ; la tension au circuit secondaire augmente, le couplage est donc devenu plus serré. A travers le condensateur commun de couplage, les deux circuits s'influencent mutuellement et le circuit secondaire prélève de l'énergie au circuit primaire.
Le couplage capacitif permet de varier le facteur de couplage d'une façon très simple. Si le condensateur de couplage utilisé est variable, le coefficient de couplage peut être réglé de manière continue. En revanche, lors de la construction du filtre il faut prendre garde à ce que les circuits ne soient pas couplés par leurs champs magnétiques (couplage non inductif) sinon un transfert d'énergie pourrait se produire par cette voie. Ce couplage inductif indésirable est évité en plaçant les deux circuits dans des boîtiers de blindage.

Le couplage par résistance ou couplage galvanique
Dans cette façon de coupler les circuits, le transfert d'énergie du circuit primaire au circuit secondaire est assuré par une résistance ohmique. Des pertes sont inévitables avec ce mode de couplage. Il ne se rencontre que très rarement en pratique.

c. Le facteur ou coefficient de couplage k
Le *coefficient de couplage k* donne la mesure du degré de couplage. Lorsque les circuits sont couplés par induction, les mêmes lois que celles appliquées au transformateur sont valables (voir figure 205 dans le chapitre VI « Le transformateur »). Si toute l'énergie du circuit primaire est transférée au secondaire, le coefficient de couplage a la valeur de 1. Le coefficient de couplage des filtres de bande HF se situe dans un ordre de grandeur allant de quelques fractions de % à quelques %.
La forme de la courbe de la bande passante est déterminée par la qualité des circuits et le coefficient de couplage. Si le coefficient de couplage d'un filtre de bande est réglable, sa courbe de réponse ainsi que sa largeur de bande peuvent être variées.

d. Les caractéristiques de transfert
La constatation du fait que le coefficient de couplage et la qualité du circuit déterminent la forme de la courbe de la bande passante se vérifie au moyen de l'expérience suivante dont le schéma est donné par la figure 271 et le montage par la figure 272.

De cette manière, le couplage inductif peut être changé en augmentant ou en diminuant la distance entre les bobines. La résistance *R* assure le découplage du circuit primaire par rapport à la basse fréquence du générateur. Les deux noyaux sont placés à environ 2 cm l'un de l'autre. La fréquence du générateur *BF* est variée jusqu'à ce que le voltmètre indique un maximum au circuit secondaire. Maintenant, les deux circuits sont accordés sur la fréquence de résonance en déplaçant l'armature. Puis, le circuit secondaire est approché progressivement du circuit primaire ; la tension au circuit secondaire augmente lentement. Dès que la distance entre les deux noyaux devient plus petite que 1 cm, la tension secondaire baisse à nouveau. Nous maintenons fixement la distance entre les noyaux pour laquelle la tension secondaire atteint son maximum.



f = fréquence sonore, variable
$C_1 = C_2 = 0{,}1\ \mu F$
$L_1 = L_2$; N = 300

Figure 271

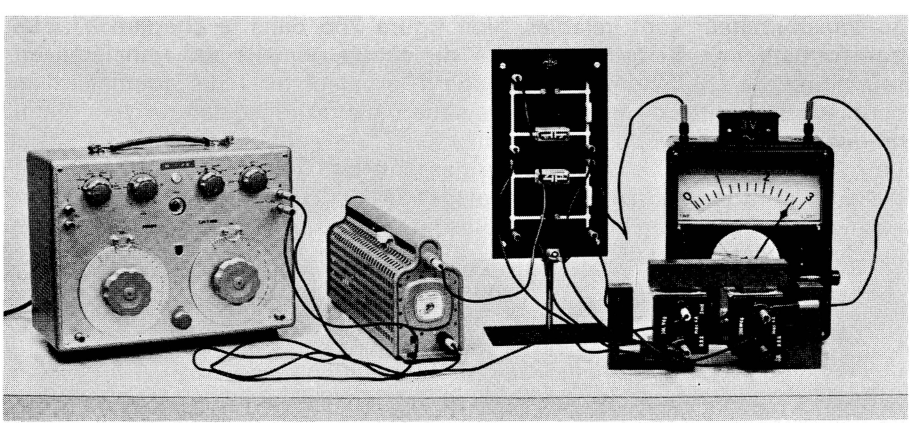


Figure 272

La bande passante du filtre doit être maintenant relevée pour ce couplage. Dans ce cas, la valeur de la tension secondaire est fonction de la fréquence. La figure 273 donne la forme de la courbe résultante.

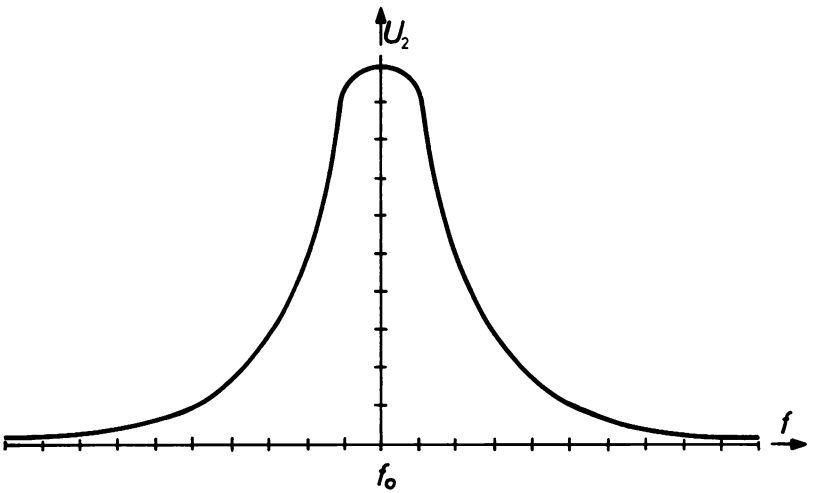


Figure 273

La mesure effectuée donne la courbe de réponse pour le *couplage critique* du filtre de bande. *Le couplage critique se produit lorsque le coefficient de couplage est suffisamment serré pour que la tension induite dans le circuit secondaire, à la fréquence de résonance, soit la plus grande possible.*
Au cours de la prochaine mesure, la distance entre les bobines est augmentée de façon à ce que la tension secondaire s'abaisse à la moitié de celle lue pour le couplage critique. Le processus de mesure est répété, reporté sur un graphique, ce qui permet d'obtenir la courbe de réponse de la figure 274.

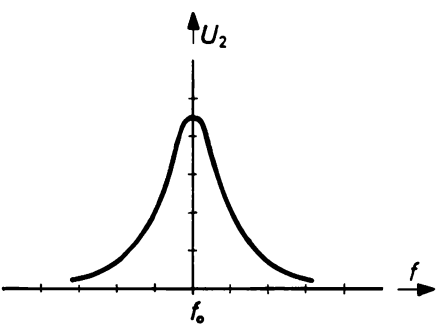


Figure 274

La série de mesures qui vient d'être effectuée montre une courbe de réponse pour un *couplage lâche. Le couplage lâche comprend tous les coefficients de couplage située au-dessous du couplage critique.*
La mesure suivante est effectuée avec un couplage plus serré que le couplage critique. A cet effet, la distance entre les circuits primaire et secondaire est diminuée de telle sorte que la tension secondaire tombe au-dessous de la tension maximale à la fréquence de résonance. La figure 275 montre l'allure de la courbe de réponse pour ce coefficient de couplage (serré).

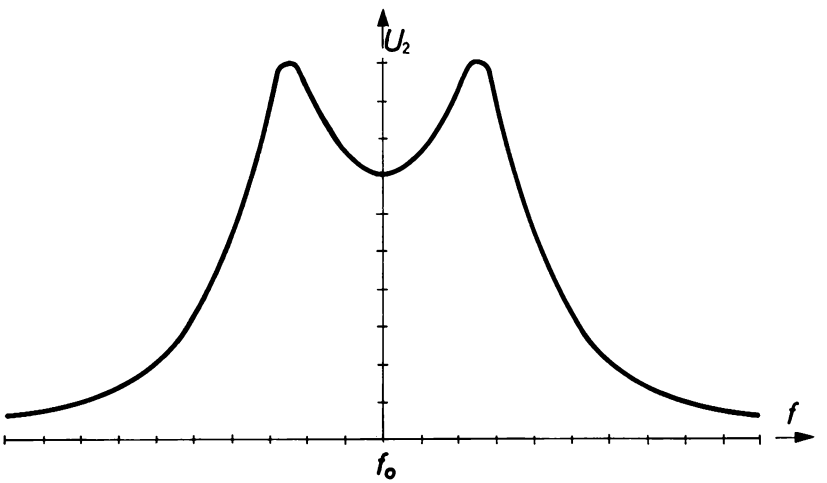


Figure 275

La courbe de réponse présente un creux à la fréquence de résonance et deux maxima symétriques de part et d'autre de cette fréquence (courbe en « dos de chameau »). Les coefficients de couplage pour lesquels la courbe présente un creux, à la fréquence de résonance sont dits serrés. *Le couplage serré comprend tous les coefficients de couplage situés au-dessus du couplage critique.*
Le couplage très serré agit sur le circuit primaire de telle manière qu'il se trouve désaccordé par le circuit secondaire. Le circuit primaire produit le même effet sur le secondaire. C'est la raison pour laquelle les fréquences de résonance des deux circuits s'éloignent l'une de l'autre en formant un creux.

e. Les conditions régissant les différents coefficients de couplage

Couplage critique

Le couplage critique se présente lorsque le produit du coefficient de couplage par la qualité du circuit est égal à 1.

$$k \cdot Q = 1$$

k = coefficient de couplage
Q = qualité du filtre

$Q = \sqrt{Q_1 \cdot Q_2}$ pour les filtres dans lesquels la qualité du circuit primaire Q_1 n'est pas la même que la qualité du circuit secondaire Q_2.

Lorsque le couplage est critique, la largeur de bande est $\sqrt{2}$ fois plus grande que pour un seul circuit de même qualité.

Couplage serré (fort)

Le couplage serré se présente lorsque le produit du coefficient de couplage par la qualité du circuit est plus grand que 1.

$$k \cdot Q > 1$$

La valeur de 2,41 ne devrait pas être dépassée sinon la tension secondaire, à la fréquence de résonance, tomberait au-dessous de $1/\sqrt{2}$ fois la valeur maximale. Un creux aussi prononcé a comme conséquence une augmentation notable des distorsions du signal transmis. Pour le couplage maximal, indiqué ci-dessus, la largeur de bande est multipliée d'un facteur de 3,1 par rapport à celle d'un circuit simple de même qualité.

Couplage lâche (faible)

Le couplage lâche se présente lorsque le produit du coefficient de couplage par la qualité du circuit est plus petit que 1.

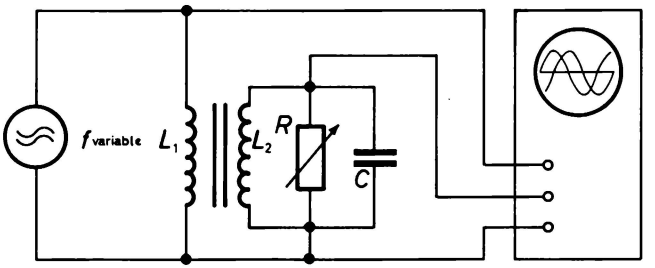
$$k \cdot Q < 1$$

Lorsque cette valeur est de 0,67, la largeur de bande du filtre présente la même valeur que celle d'un circuit simple de même qualité.

f. Relation de phase entre la tension primaire et celle du secondaire

Le déphasage, entre les tensions primaire et secondaire d'un filtre de bande, ne revêt de l'importance que lorsqu'il est utilisé comme composant dans le circuit d'un discriminateur.

Nous verrons plus tard que la majorité des récepteurs modernes utilisent des discriminateurs pour démoduler les signaux modulés en fréquence (FM). Nous allons nous occuper pour commencer des relations de phase (déphasage) dans les filtres de bande. L'expérience suivante doit nous aider à saisir, par des mesures techniques, les rapports de phase dans les filtres (déphasage). La figure 276 en donne le schéma et la figure 277 montre une photo du montage.



f = fréquence sonore, variable
$L_1 \rightarrow N = 300$; $L_2 \rightarrow N = 600$
C = 8 à 12 μF

Figure 276

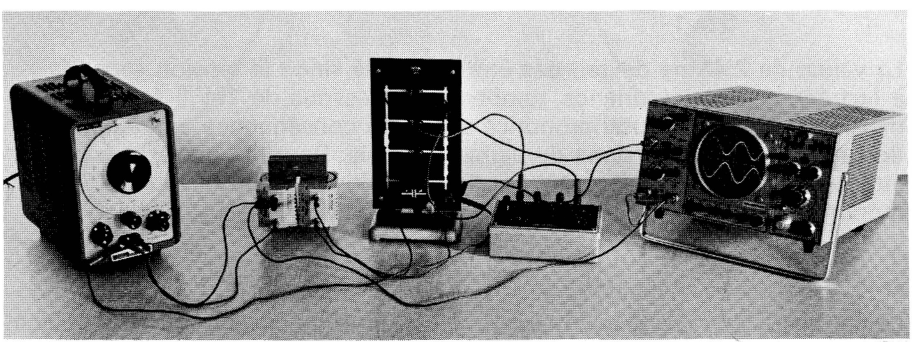


Figure 277

Il n'est pas nécessaire d'accorder le circuit primaire car le courant et la tension dans l'inductance primaire ont le même comportement de phase que dans un circuit accordé. La fréquence du générateur est ajustée jusqu'à ce que le système entre en résonance, ce qui s'observe par un accroissement subit du signal sur l'écran de l'oscilloscope. L'oscilloscope à double trace permet l'observation simultanée des tensions au circuit primaire et au secondaire. Une trace montre la tension au circuit primaire et l'autre celle de la tension secondaire. A la fréquence de résonance, le déphasage observé entre la tension primaire et celle du secondaire est de 90°.

Au cours de la mesure suivante, la fréquence du générateur est plus élevée que celle à la résonance. Le déphasage observé est plus grand que 90°. Puis la fréquence du générateur est amenée au-dessous de la fréquence de résonance et l'on observe que le déphasage est plus petit que 90°. L'explication des raisons qui provoquent ce déphasage sort du cadre de cet ouvrage. Nous prenons connaissance de ce déphasage sans en apporter la démonstration mathématique.

4. Exemple

Dans un récepteur, un filtre de bande à couplage variable est utilisé. Il s'agit ici d'un filtre symétrique dont la qualité est de 200. La fréquence de résonance est de 455 kHz.
Calculer les valeurs suivantes :
- largeur de bande et coefficient de couplage lors du couplage critique ;
- largeur de bande et coefficient de couplage lors d'un couplage serré maximal tolérable ;
- lors d'un couplage lâche : coefficient de couplage pour une largeur de bande dont la valeur correspond à celle d'un circuit simple.

Marche à suivre :
Première étape : calcul de la largeur de bande et du coefficient de couplage lorsque le couplage est critique

- écrire la formule de base $b = \frac{f_o}{Q} \cdot \sqrt{2}$
- introduire les valeurs et calculer $b = \frac{455 \cdot 10^3}{200} \cdot \sqrt{2}$

  $b = \mathbf{3{,}22\ kHz}$
- écrire la formule de base $k \cdot Q = 1$
- extraire k de la formule $k = \frac{1}{Q}$
- introduire les valeurs et calculer $k = \frac{1}{200} \cdot 100\%$

  $k = \mathbf{0{,}5\ \%}$

Deuxième étape : calculer la largeur de bande et le coefficient de couplage pour le couplage serré maximal tolérable

- écrire la formule de base $b = \frac{f_o}{Q} \cdot 3{,}1$
- introduire les valeurs et calculer $b = \frac{455}{200} \cdot 3{,}1\ 10^3$

  $b = \mathbf{7{,}05\ kHz}$

– écrire la formule de base $k \cdot Q = 2{,}41$

– extraire k de la formule $k = \dfrac{2{,}41}{Q}$

– introduire les valeurs et calculer $k = \dfrac{2{,}41}{200} \cdot 100\%$

$k = \mathbf{1{,}205}\%$

Troisième étape : calculer le coefficient de couplage pour un couplage lâche encore juste tolérable

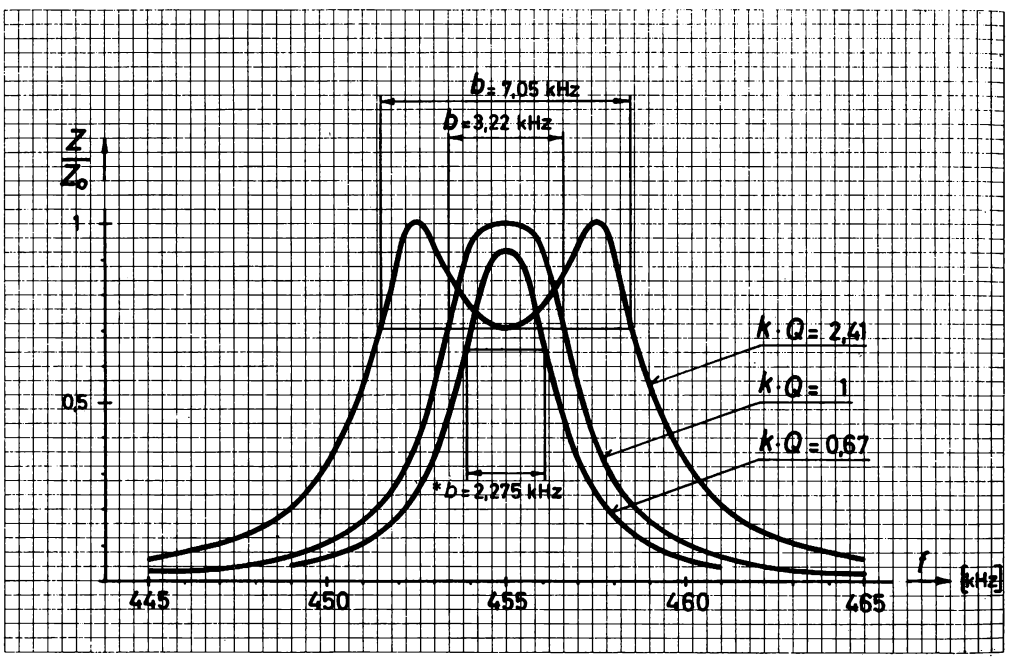
– écrire la formule de base $k \cdot Q = 0{,}67$

– extraire k de la formule $k = \dfrac{0{,}67}{Q}$

– introduire les valeurs et calculer $k = \dfrac{0{,}67}{200} \cdot 100\%$

$k = \mathbf{0{,}335}\%$

Les courbes de ces exemples ont été calculées et la figure 278 en montre l'aspect.



$*b = \dfrac{455 \cdot 10^3}{200}$

Figure 278

5. L'essentiel

Le filtre de bande se compose d'au moins deux circuits oscillants couplés. Pour la plupart des filtres, le couplage est inductif ou capacitif.
Le filtre de bande présente deux flancs plus raides qu'un circuit simple, par conséquent il permet une meilleure sélectivité tout en possédant une largeur de bande suffisante.
La forme de la bande passante est déterminée par le coefficient de couplage et la qualité du circuit. Lorsque le couplage est lâche (faible) la bande passante ressemble à celle d'un circuit simple. Pour un couplage critique, la tension maximale se développe dans le circuit secondaire, les flancs deviennent raides et la largeur de bande est plus grande que celle d'un circuit simple de même qualité Dans le cas d'un couplage serré (fort) la largeur de bande augmente beaucoup et à la fréquence de résonance il se produit un creux dans la courbe de réponse.
Lors de la résonance, un déphasage de 90° se produit entre les tensions primaire et secondaire du filtre de bande. Quand les fréquences s'écartent de la fréquence de résonance, ce déphasage est plus grand ou plus petit que 90°.

6. Exercices de répétition (solutions page 477)

a) Quels sont les avantages que présente le filtre de bande par rapport au circuit simple ?
b) Où les filtres de bande sont-ils principalement utilisés ?
c) Quels genres de couplages connaissez-vous ?
d) Quels sont les facteurs qui influencent la courbe de réponse d'un filtre de bande ?
e) Comment s'expriment les conditions qui régissent le couplage critique ?
f) Pour quel degré (ou coefficient) de couplage un creux commence-t-il à se former ?
g) Dessinez les courbes de réponse d'un filtre dont le couplage est lâche, critique et serré.
h) Quel est le moyen le plus simple de varier le coefficient de couplage d'un filtre à couplage inductif ?

G. Tubes électroniques

I. La diode

1. Introduction

Le jour où Edison introduisit une plaque de métal à l'intérieur de l'ampoule d'une lampe à incandescence et qu'il y fit le vide, il s'aperçut qu'un courant s'écoulait entre la plaque et le filament dès que celui-ci était chauffé. La figure 279 montre l'expérience d'Edison.

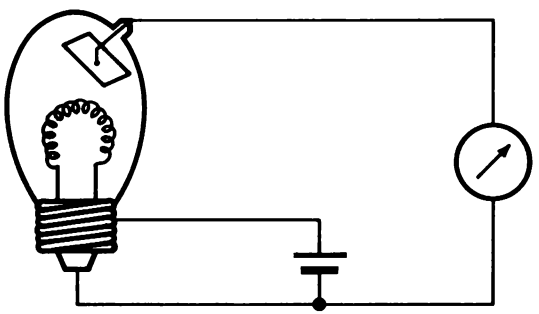


Figure 279

Cette expérience fut le début du succès triomphal des tubes électroniques. Les diodes à vide modernes, dont la construction est un peu plus compliquée que la diode d'Edison, ont un fonctionnement dont le principe est cependant resté le même.
Les diodes ont des emplois multiples dans la technique des télécommunications. Nous les rencontrons dans les démodulateurs pour redresser les signaux, dans les appareils d'alimentation comme redresseurs de la tension du réseau. Dans bien des circuits spéciaux et dans les appareils de mesure elles sont utilisées comme valves (ou soupapes).

2. Que savez-vous au sujet des diodes?
(solutions page 479)

a) Décrivez la construction d'une diode et nommez-en les électrodes.
b) Pourquoi dans l'ampoule d'une diode les électrodes sont-elles dans le vide d'air?
c) Pourquoi les électrons quittent-ils la cathode?
d) Quels sont les procédés qui permettent d'augmenter le courant anodique dans la diode?
e) Qu'entendez-vous par le terme « cathode à chauffage indirect »?
f) Expliquez l'expression « charge d'espace ».

3. La diode

a. Conduction du courant dans le vide

Le courant électrique est provoqué par des porteurs de charges en mouvement. La conduction du courant, à travers le vide, est réalisé par les électrons libres qui se meuvent de la cathode vers l'anode. Dans le vide on ne rencontre pratiquement plus de molécules gazeuses et de ce fait, les électrons peuvent se mouvoir sans être gênés et ne risquent pas d'entrer en collision avec des molécules gazeuses. Dans le vide, sous l'influence d'un champ électrique, ces électrons libres sont accélérés. Leur accélération dépend de l'intensité du champ qui leur est appliqué. Sur la figure 280 nous reconnaissons la *cathode* qui est le dispensateur (ou émetteur) d'électrons et, lui faisant face, l'*anode* qui capte cet essaim (flux) d'électrons. En appliquant une tension sur l'anode ou *tension anodique*, un champ électrique s'établit entre les deux électrodes. L'anode qui est positive attire les électrons (négatifs). Plus la tension appliquée sur l'anode est élevée d'autant plus grande sera la vitesse avec laquelle les électrons se précipiterons sur elle. Le sens conventionnel du courant électrique adopté va du pôle plus au pôle moins de la source de tension. Cette convention provient de l'époque où la nature de l'électricité n'était pas encore bien connue. Nous savons, aujourd'hui, que les électrons se déplacent du pôle moins vers le pôle plus de la source de tension mais malgré cela le sens d'écoulement originel ou conventionnel du courant est conservé. *Le sens conventionnel du courant anodique est contraire au sens du déplacement du flux électronique.*

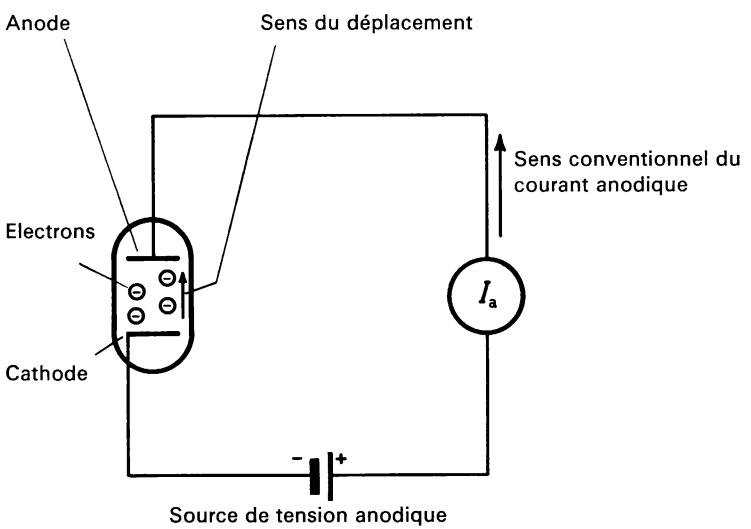


Figure 280

Un certain temps est nécessaire pour que les électrons se déplacent de la cathode à l'anode. La vitesse d'impact des électrons sur l'anode, qui dépend de la tension anodique, est en moyenne de 10 000 km/sec.

b. L'émission des électrons

Pour que les électrons puissent quitter un conducteur ils doivent avoir une certaine vitesse de manière à pouvoir vaincre les forces d'attraction actives dans le conducteur. La vitesse nécessaire est distribuée aux électrons, dans la cathode, par l'apport d'énergie calorifique. La cathode est chauffée et ainsi la vitesse moyenne des électrons libres augmente. Alors une partie des électrons atteint la vitesse critique qui leur est nécessaire pour quitter la cathode. Ces électrons quittent la cathode et s'en vont vers l'anode sous l'influence de la tension anodique. La manière dont la cathode est chauffée est fondamentalement sans importance. Dans les tubes électroniques, le chauffage se fait électriquement. Cette émission d'électrons par *chauffage* de la cathode se nomme : *émission thermoïonique.*

c. La charge d'espace

Dans un conducteur, le courant et par conséquent la charge en mouvement sont proportionnels à la tension appliquée. Au contraire, les mouvements d'électrons dans le vide ont un comportement différent. Les électrons, qui se déplacent sous l'influence de la tension anodique sont animés d'une vitesse croissante en direction de l'anode. Dans un conducteur, les électrons se déplacent avec une vitesse uniforme. Tous les électrons qui quittent la cathode n'atteignent pas l'anode et une partie de ceux-ci restent aux environs de la cathode. Un « nuage d'électrons » se forme autour de la cathode. Ce nuage d'électrons se comporte comme une charge électrique et c'est pour cette raison qu'on lui donne le nom de *charge d'espace*. Par suite de sa polarisation négative elle se comporte comme un frein pour les électrons qui quittent la cathode. En augmentant la tension anodique, la densité de la charge d'espace diminue constamment et son influence finit par disparaître. A partir d'une tension déterminée de la tension anodique tous les électrons émis atteignent l'anode, la charge d'espace ayant disparu. En augmentant de plus en plus la tension anodique, le courant d'anode n'augmente plus : la diode travaille dans la zone de saturation. Le courant anodique maximal s'appelle : *courant de saturation.*

d. Le courant initial ou courant de démarrage

Lors de son expérience, Edison remarqua que même en l'absence d'une tension anodique ou d'une tension anodique légèrement négative un petit courant anodique s'écoulait. Ce courant fut nommé : *courant initial.* Il est créé grâce à la vitesse propre d'une partie des électrons qui quittent la

cathode. La vitesse de sortie de ces électrons est suffisante pour qu'ils soient capables de charger l'anode même en l'absence d'un champ électrique accélérateur.
Toutefois, malgré une petite tension négative, des électrons atteignent l'anode avec une grande vitesse de sortie. Dans les diodes et les tubes amplificateurs, le courant initial joue un rôle important.

e. La cathode

La cathode a pour fonction d'émettre des électrons. Pour certaines substances la capacité d'émettre des électrons est particulièrement marquée. Si l'on recouvre le filament d'une diode avec l'un de ces matériaux – l'oxyde de baryum est le plus employé – on obtient ainsi une cathode à chauffage direct. La figure 281 montre la construction et le symbole d'une *cathode à chauffage direct.*

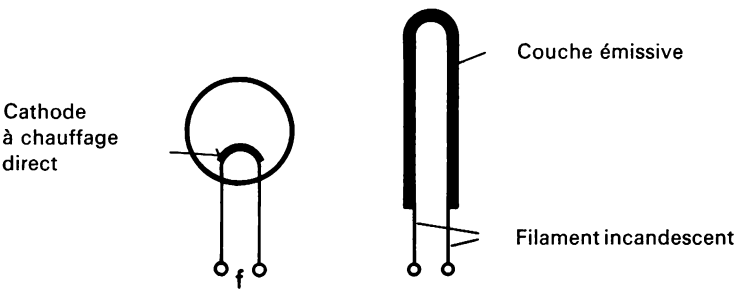


Figure 281

Les tubes avec cathode à chauffage direct sont, avant tout, utilisés dans les appareils alimentés par des batteries. Dans les appareils dont le chauffage s'effectue par du courant alternatif il n'est pas indiqué de les utiliser car leur filament possède une inertie thermique trop petite. Le courant électronique émis oscille au rythme de la fréquence du courant de chauffage. Pour l'alimentation en courant alternatif, des tubes possédant une *cathode à chauffage indirect* sont nécessaires. La cathode à chauffage indirect se compose d'un filament hélicoïdal chauffant, isolé et placé à l'intérieur d'un petit tube métallique. Ce petit tube sert de support à la couche émissive. Par ce moyen l'inertie thermique de la cathode est augmentée, la fréquence du courant de chauffage ne peut plus influencer le courant cathodique. La séparation du circuit de chauffage de celui de la cathode apporte en outre de grands avantages pour l'exécution technique des circuits. La figure 282 montre la construction de principe d'une cathode à chauffage indirect.

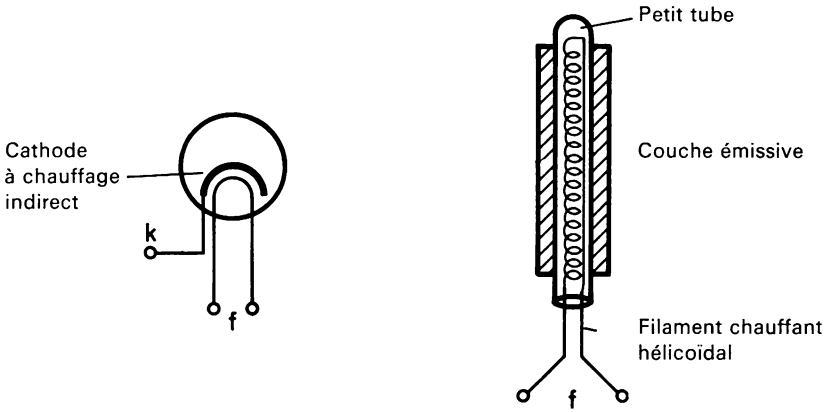


Figure 282

f. L'anode

L'anode se compose d'une tôle de nickel ou d'acier. Elle est le plus souvent cylindrique ou ovale et disposée autour de la cathode. La figure 283 montre la construction de principe d'une diode tandis que, sur la figure 284, quelques formes d'exécution sont visibles.

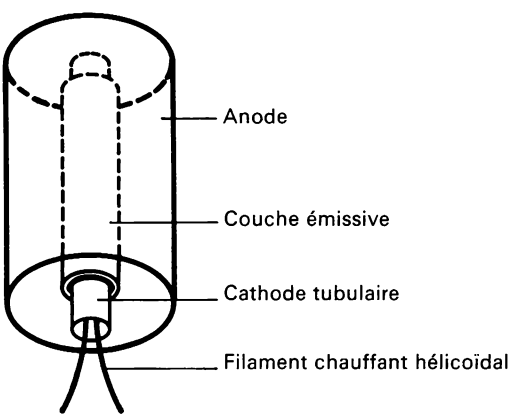


Figure 283

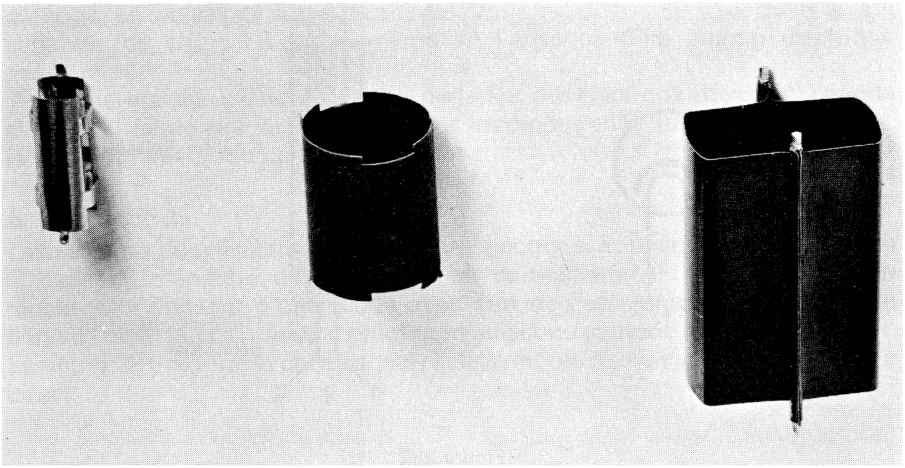


Figure 284

Les électrons qui bombardent l'anode possèdent une énergie cinétique considérable : lorsqu'ils l'atteignent ils sont brusquement freinés et leur énergie cinétique se transforme en énergie thermique qui a pour effet d'échauffer l'anode. Cet échauffement est d'autant plus intense que plus d'électrons atteignent l'anode et que leur vitesse est élevée, il augmente avec l'élévation du courant et la tension anodique. La charge maximale admissible sur l'anode s'exprime par le terme de : *dissipation anodique. La charge d'anode maximale admissible est celle de la puissance qui peut être transformée en chaleur dans la tôle de l'anode.* Lorsque, seule une tension continue est appliquée à l'anode la puissance anodique peut facilement se mesurer. Elle correspond au produit du courant anodique par la tension d'anode.

$$P_{ad} = I_a \cdot U_a$$

L'évacuation de la chaleur dans le vide ne peut se faire que par rayonnement, c'est pour améliorer ce rayonnement calorifique que les tôles des anodes sont noircies.

g. Définition de la diode

La *diode* est la forme la plus simple d'un tube électronique. Elle possède deux électrodes : la cathode et l'anode. La cathode émet le courant d'électrons qui est capté par l'anode. La diode agit comme une soupape ou une valve électrique car le courant ne peut s'écouler que dans un seul sens.

h. Symboles

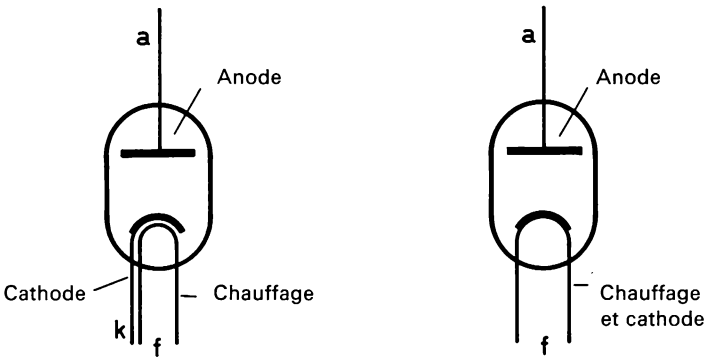


Figure 285

i. Construction

Le principe de construction d'une diode est visible sur la figure 286. La figure 287 nous montre l'intérieur d'une double diode.

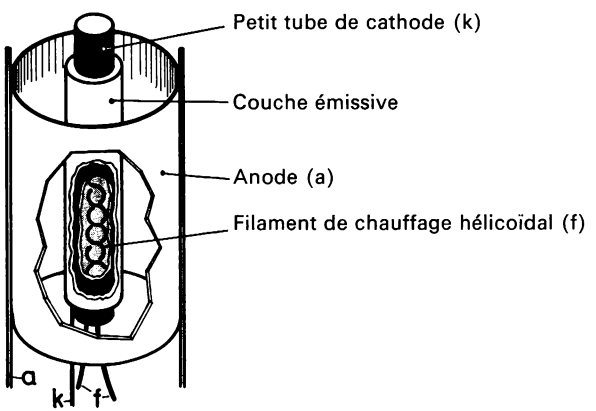


Figure 286

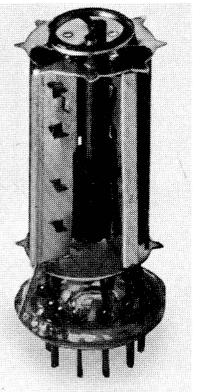


Figure 287

k. Fonctionnement

L'expérience suivante permet d'analyser le fonctionnement de la diode. Le schéma de l'essai et son montage sont donnés par les figures 288 et 289. (La figure 289 ne correspond pas tout à fait au schéma de la figure 288 car pour obtenir la tension anodique négative il faut croiser les fiches à la source de courant.)

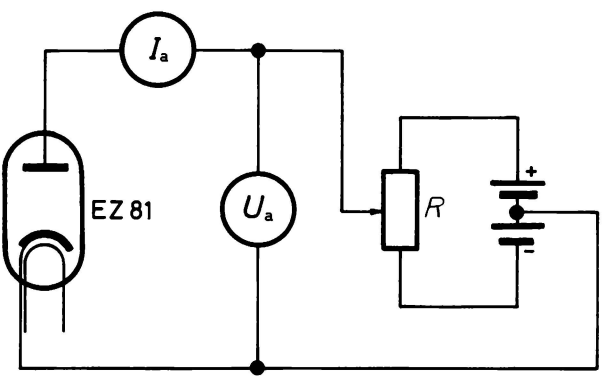


Figure 288

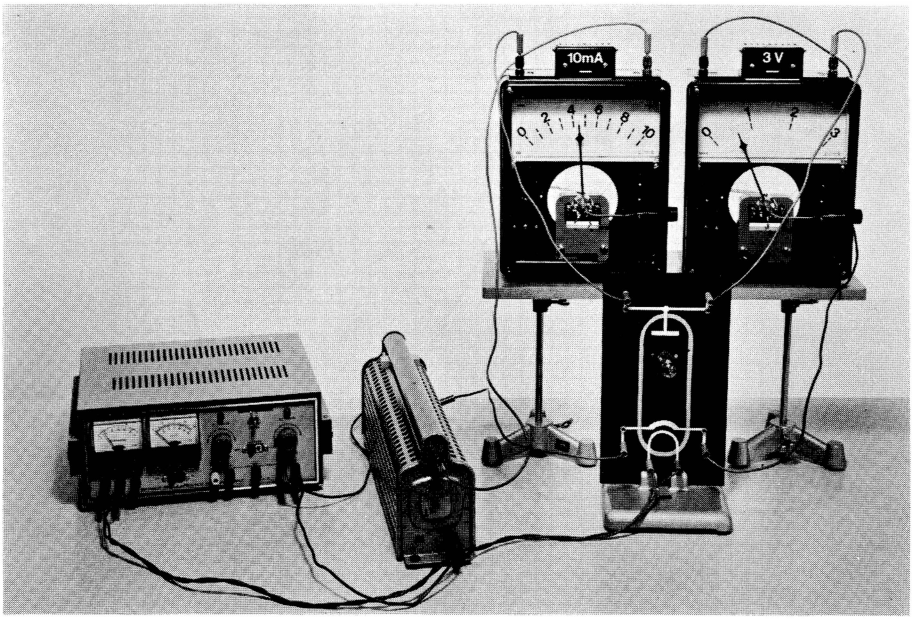


Figure 289

La *tension anodique* U_a est réglée sur zéro volt. L'ampèremètre mesure un faible *courant anodique* I_a. Ce courant anodique devient nul lorsque la tension anodique est amenée à environ 2 volts négatifs. Dès que la tension anodique est positive, le courant croît rapidement dans le tube. Sur le diagramme de la figure 290, la caractéristique du courant d'anode en fonction de la tension d'anode est reportée d'après le résultat des mesures.
Si la tension d'anode est encore augmentée, le courant anodique reste constant à partir d'une certaine tension. Le courant anodique ne peut plus croître car la cathode ne peut pas émettre plus d'électrons *

* Afin de ménager le tube EZ 81, cet essai ne peut pas être effectué car une trop grande densité de courant sur la cathode pourrait arracher des parties de la couche émissive.

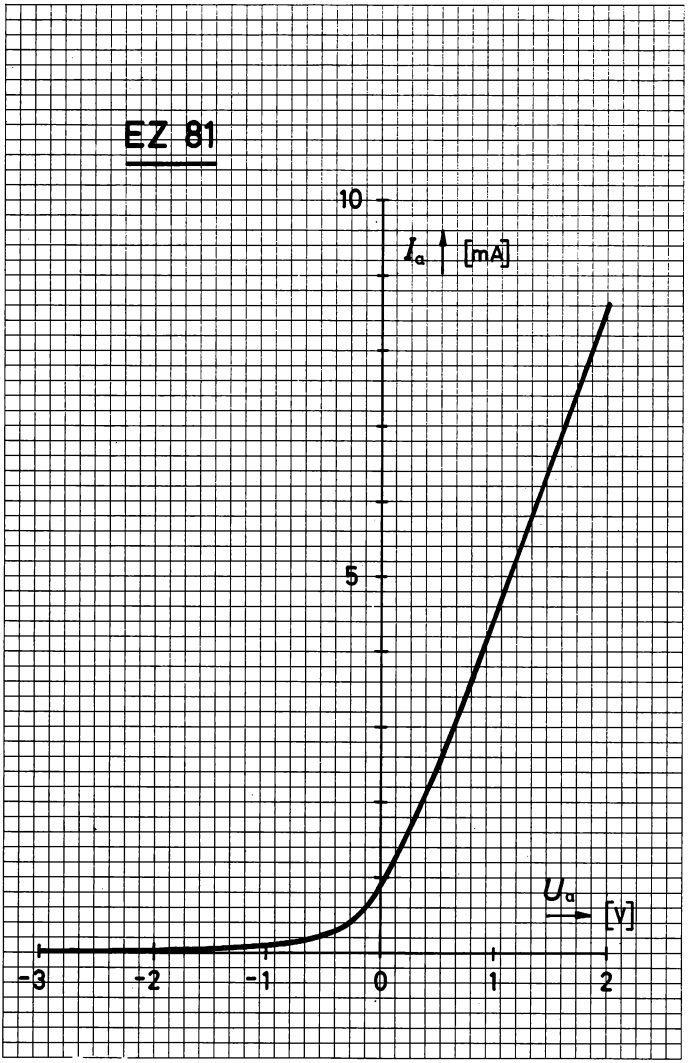


Figure 290

L'énergie de chauffage fournie ne peut plus émettre d'autres électrons ayant l'énergie de sortie nécessaire. La figure 291 montre la caractéristique d'une diode pour laquelle une tension anodique plus élevée n'occasionne plus d'élévation du courant anodique.

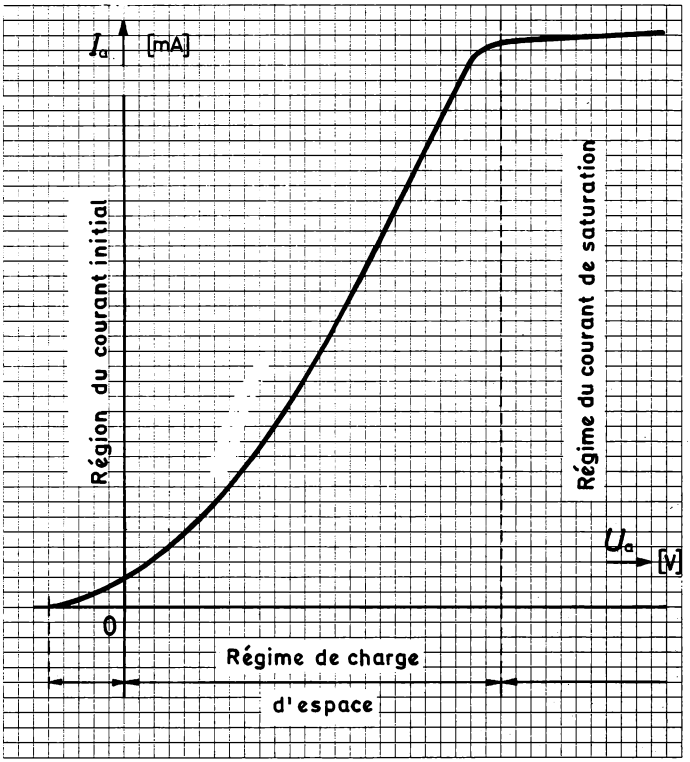


Figure 291

La caractéristique d'une diode se divise en trois régions (ou zones) :
- Dans la *région du courant initial,* le courant anodique est créé par la vitesse propre des électrons qui ont quitté la cathode.
- Dans le *régime de charge d'espace*, le courant anodique est influencé par la charge d'espace et la tension anodique.
- Dans le *régime du courant de saturation,* tous les électrons émis par la cathode atteignent l'anode. La charge d'espace a disparu. Une élévation de la tension anodique ne provoque plus aucune augmentation du courant anodique car la possibilité d'émission de la cathode est totalement mise à contribution.

Les diodes modernes fonctionnent bien au-delà du régime de saturation. La tension anodique maximale admissible se situe au-dessous de la tension de saturation.

I. Données techniques

– *La résistance interne en courant continu*

La résistance interne en courant continu de la diode est donnée par les quotients de la tension anodique continue par le courant anodique continu. Cette résistance interne, en courant continu, joue un rôle dans les circuits redresseurs car elle agit comme une résistance en série dans le circuit. Lors de variation de la charge, la chute de tension à travers le tube et par conséquent la tension aux bornes du redresseur varient. La résistance interne en courant continu peut être évaluée graphiquement, selon la figure 292, en effectuant la lecture de la tension anodique continue et du courant anodique continu pour le point de travail considéré de la courbe caractéristique.

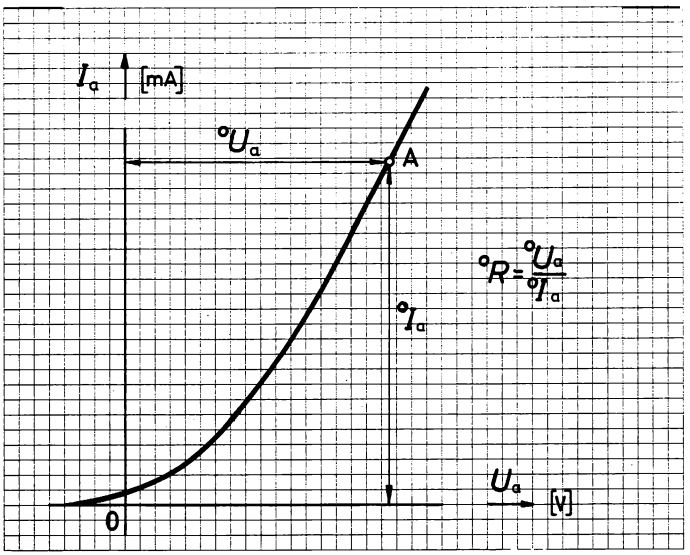


Figure 292

– *La résistance interne en courant alternatif* R_i

La résistance interne en courant alternatif de la diode est, avant tout, intéressante lorsque celle-ci est insérée dans un circuit comme résistance variable en courant alternatif.

Ce genre d'utilisation se rencontrait fréquemment dans les anciens petits émetteurs à modulation de fréquence. *La résitance interne en courant alternatif* R_i *est celle que la diode oppose à une variation de tension.* Elle se mesure techniquement en effectuant une petite variation de tension et en observant la variation de courant qui en résulte. La résistance interne en courant alternatif se calcule donc comme suit :

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

Le signe Δ (delta) indique une variation de la grandeur qui le suit. La résistance interne peut aussi être mesurée graphiquement en dessinant la tangente au point de fonctionnement. Celle-ci donne la pente de la courbe au point de fonctionnement. La pente de la tangente exprime la résistance de la diode pour le point de travail. La figure 293 montre le procédé graphique.

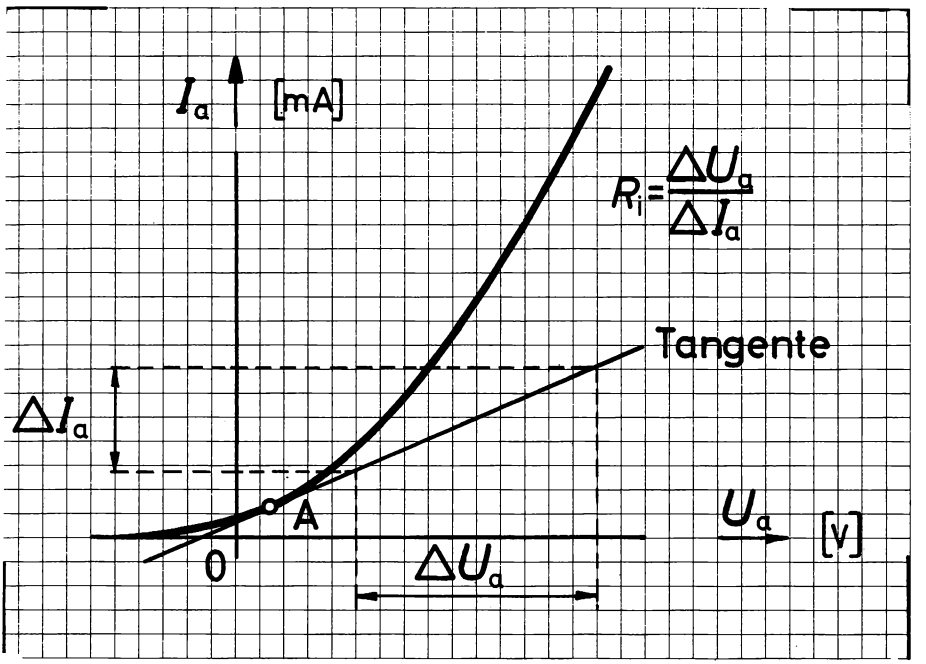


Figure 293

On désigne par le terme de *point de fonctionnement* (point figuratif ou point de travail) le lieu déterminé sur la caractéristique par la tension anodique appliquée et le courant anodique qui lui correspond. Pour chaque caractéristique, qui est courbe, la résistance interne dépend de la position du point de travail puisque l'inclinaison de la caractéristique est différente pour chaque point de fonctionnement.

4. Exemples

a. Déterminer la résistance interne en courant continu

Déterminer la résistance interne en courant continu du tube EZ 81 pour le point fonctionnement A_3 de la caractéristique selon la figure 294.

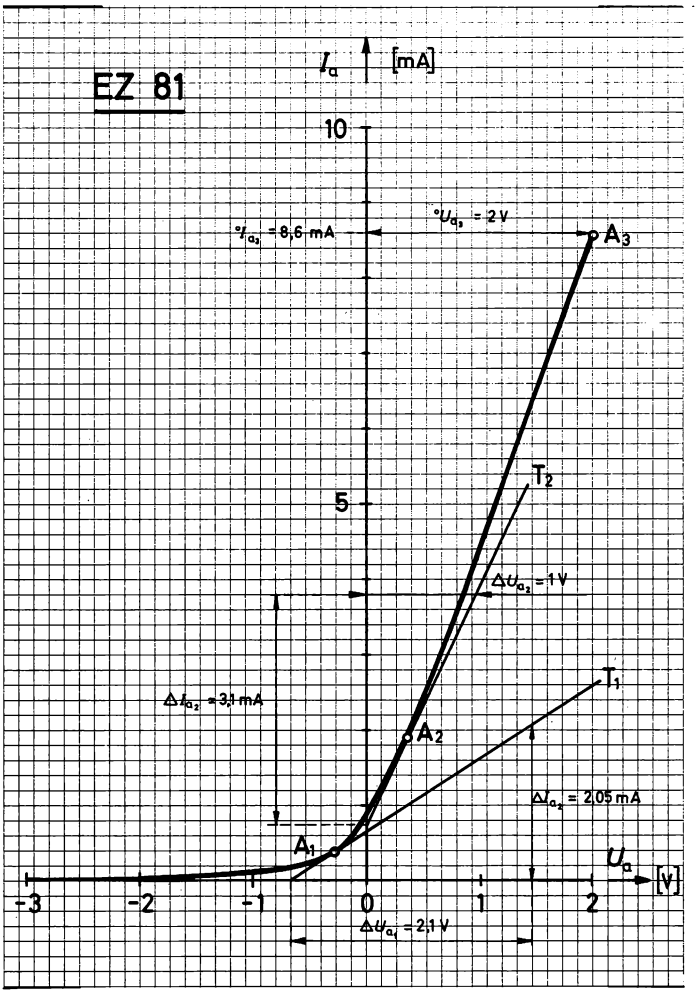


Figure 294

Marche à suivre:

- lire sur le diagramme la tension et le courant anodique qui correspondent au point de fonctionnement A_3
- écrire la formule de la résistance interne en courant continu

$$^{\circ}R = \frac{^{\circ}U_a}{^{\circ}I_a}$$

- introduire les valeurs et calculer

$$^{\circ}R = \frac{2}{8{,}6 \cdot 10^{-3}}$$

$$^{\circ}R = \mathbf{232{,}558}\ \Omega$$

b. Déterminer la résistance interne en courant alternatif

Selon la figure 294, calculer la résistance interne en courant alternatif du tube EZ 81 pour les points de fonctionnement A_1 et A_2.

Marche à suivre:

- tracer les tangentes T_1 et T_2 aux points de fonctionnement A_1 et A_2 de la caractéristique;
- évaluer les variations de tension et de courant anodique pour les deux points de fonctionnement à l'aide des tangentes;
- écrire la formule de base de la résistance interne en courant alternatif

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

- introduire les valeurs pour les deux cas et calculer

$$R_{i2} = \frac{1}{3{,}1 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{i2} = \mathbf{323}\ \Omega$$

$$R_{i1} = \frac{2{,}1}{2{,}05 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{i1} = \mathbf{1024{,}34}\ \Omega$$

Cet exemple a clairement démontré, au moyen de la caractéristique d'un tube redresseur, que la *résistance interne en courant alternatif* d'une diode dépend du point de fonctionnement. Plus la pente de la tangente est faible, d'autant plus grande sera la résistance interne. Par la même occasion, nous constatons que *la résistance en courant continu* d'un tube *n'a rien de commun avec la résistance interne en courant alternatif.* Nous retenons donc: la résistance interne en courant alternatif d'une diode est celle que le tube oppose à une variation de tension. Il provient du quotient de la variation de tension par la variation de courant.

5. L'essentiel

Dans le vide, une conduction du courant est possible parce que les électrons ne rencontrent aucun obstacle que ce soit, provenant de molécules ou d'atomes.
Dans les tubes, la cathode est la source des électrons. Elle est chauffée et émet des électrons. L'émission électronique provient de l'état d'échauffement de la cathode. Sous l'influence d'une tension anodique positive, les électrons sont accélérés et captés par l'anode.
Lorsque la tension anodique est négative il ne s'écoule aucun courant pratiquement utilisable : la diode est bloquée.
Les diodes se comportent comme des soupapes électriques, elles ne laissent passer le courant que dans un seul sens.
Dans la région du courant initial, un faible courant s'écoule à cause de la vitesse propre des électrons. Ce courant initial commence aussi à s'écouler même si la tension anodique est faiblement négative.
Dans le régime de charge d'espace, la cathode est entourée d'un nuage d'électrons. Ce dernier freine les électrons émis et il est responsable de la non linéarité de la courbe caractéristique. En régime de saturation tous les électrons émis s'écoulent vers l'anode.
On distingue des cathodes à chauffage direct et à chauffage indirect.
La puissance de dissipation de l'anode est celle qui est transformée en chaleur dans la tôle de l'anode ; elle correspond au produit de la tension par le courant d'anode à la condition qu'une tension alternative supplémentaire ne soit pas appliquée au tube. La valeur maximale de la puissance de dissipation d'anode ne doit pas être dépassée sinon le tube serait détruit. La résistance interne en courant continu du tube se calcule en faisant le quotient de la tension par le courant anodique.
La résistance interne en courant alternatif est celle qui s'oppose à une variation de la tension anodique. Elle peut s'estimer graphiquement sur la courbe caractéristique en traçant la tangente au point de fonctionnement. La pente de la tangente donne une mesure de la grandeur de la résistance interne en courant alternatif.

6. Exercices de répétition (solutions page 480)

a) Pourquoi un flux de courant est-il possible dans le vide ?
b) Quelle est la condition pour que la cathode puisse émettre des électrons ?
c) Quel est l'effet de la charge d'espace sur le courant anodique ?
d) Dessinez la courbe caractéristique d'une diode et divisez-la en ses trois régimes de fonctionnement.
e) Quels sont les facteurs qui déterminent la puissance de dissipation de l'anode d'une diode ?
f) Quelle est la cause qui provoque le courant initial ?
g) Définissez la puissance de dissipation anodique.
h) Calculez la résistance interne en courant alternatif de la diode pour le point de fonctionnement dessiné, selon la figure 295.

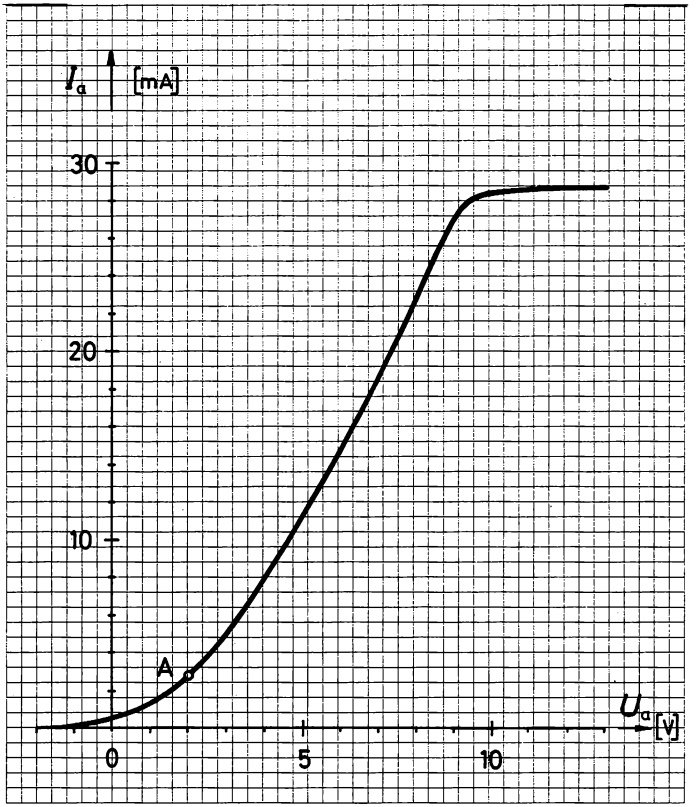


Figure 295

i) Comment calculer la résistance interne en courant continu de la diode pour un point de fonctionnement déterminé ?

k) Nommez un domaine d'application d'une diode où sa résistance interne en courant alternatif joue un rôle ?

II. La triode

1. Introduction

Grâce à la découverte de la triode un élément actif était réalisé qui permettait l'amplification et la production de signaux électriques. La triode fut, pendant longtemps, le seul composant amplificateur. Par la suite, d'autres types de tubes furent construits pour des applications spéciales où la triode ne pouvait pas convenir. De nos jours, le domaine d'utilisation de la triode se limite principalement à l'amplification de signaux basse fréquence, la production d'oscillations électriques et dans les appareils de mesure. Elle n'est utilisée, comme amplificateur haute fréquence, que dans des circuits spéciaux.

2. Que savez-vous au sujet des triodes ?

(solutions page 482)

a) De combien d'électrodes la triode est-elle composée ?
b) Comment s'appellent ces électrodes ?
c) Avec quelle électrode le courant anodique est-il commandé ?
d) Que représente pour vous l'expression « pente » ?
e) Une triode peut-elle être commandée sans puissance ?
f) Une triode peut-elle être, aussi, utilisée comme amplificateur de puissance ?

3. La triode

a. Définition

La *triode* est la forme la plus simple d'un tube amplificateur. Elle comporte trois électrodes. La cathode émet le courant d'électrons qui quitte le tube par l'anode tandis que ce courant est commandé par une tension appliquée à *la grille*

b. Symbole

La figure 296 montre les symboles de triodes à chauffage indirect et direct.

c. Construction

La triode se compose de trois électrodes contenues dans un tube de verre dans lequel un vide aussi parfait que possible est réalisé. La *grille de commande* est disposée entre la cathode et l'anode. Elle consiste en un fil spiralé de forme cylindrique ou monté sur un cadre rectangulaire.

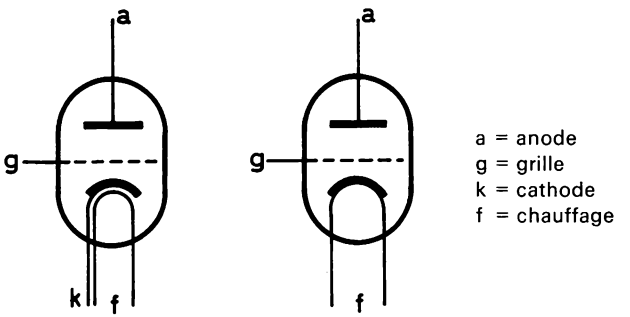


Figure 296

La forme de la grille est déterminée par celle de l'anode. La figure 297 montre schématiquement la construction d'une triode.

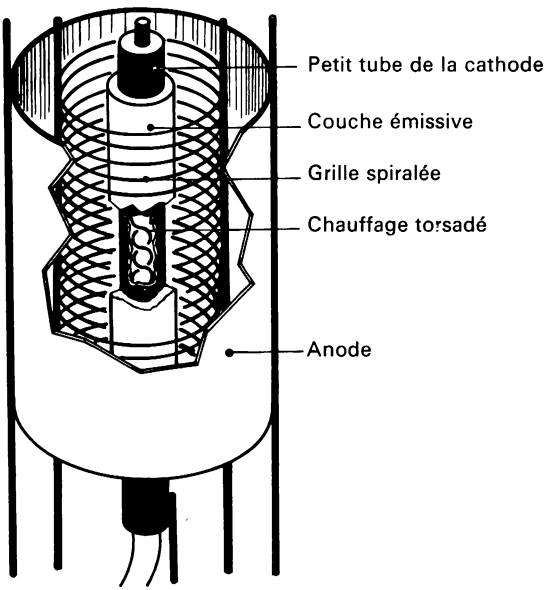


Figure 297

d. Fonctionnement

Une tension négative sur la grille de commande freine l'émission du courant de la cathode. Ce courant est soumis à la tension appliquée sur la grille de commande. Dans la zone des tensions négatives de grille, l'espace entre la cathode et la grille est bloqué. Aucun courant ne s'écoule par la grille si l'on excepte le courant initial. Afin de pouvoir commander le tube sans perte de puissance, on choisit des tensions de commande négatives pour qu'aucun courant ne s'écoule par la grille.

Le comportement de la triode est étudié au moyen du circuit de la figure 298 et la figure 299 nous donne une photo du montage d'essai. Lors de la première mesure, la tension de grille est de zéro volt. La tension anodique est lentement élevée de 0 à 200 volts. Le courant anodique augmente avec la tension croissante de l'anode : le tube se comporte comme une diode.

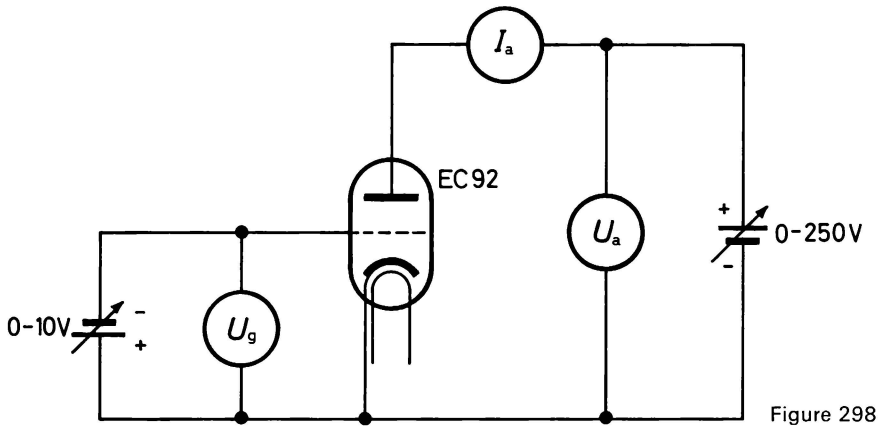


Figure 298

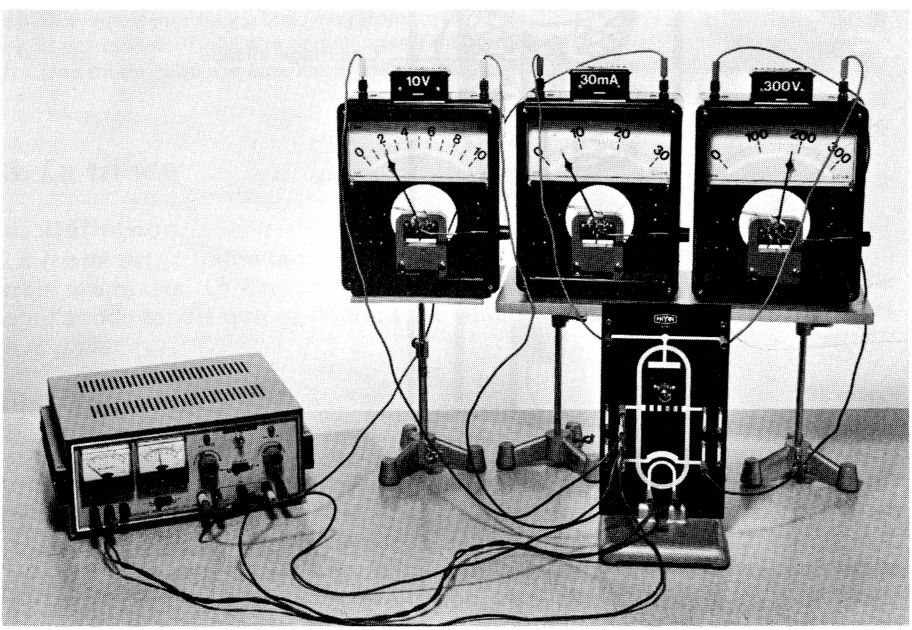


Figure 299

Au cours de la deuxième mesure, la tension anodique est maintenue fixe à 200 V et la tension de polarisation de grille est graduellement élevée de 0 à −10 V. Le courant anodique diminue et pour une tension de polarisation de −6 V il est déjà voisin de zéro. L'essai reste limité aux tensions négatives de grille. Puisque, pour des tensions positives de grille un courant de grille s'établirait – l'espace cathode – grille se comporte comme une diode – cette zone est sans intérêt car, dans celle-ci, une commande sans puissance n'est plus possible. Maintenant, le comportement du tube doit être enregistré par des mesures techniques dont le résultat sera reporté sur un graphique. Pour ce faire, la dépendance du courant anodique par rapport à la tension de grille est dessinée en prenant des tensions d'anode de 100, 150, 200 et 250 V. Nous obtenons un *réseau de courbes caractéristiques* $I_a - U_g$. La deuxième série de mesures se poursuit avec diverses tensions de grille : 0, −1, −2, −3 et −4. Pour ces tensions de grille, la dépendance du courant d'anode par rapport à sa tension est analysée. Le résultat de ces mesures donne le *réseau de courbes caractéristiques* $I_a - U_a$. La figure 300 montre le résultat des mesures sous la forme de *courbes caractéristiques du tube.* Les *données concernant le tube* se déduisent graphiquement de ces courbes caractéristiques.

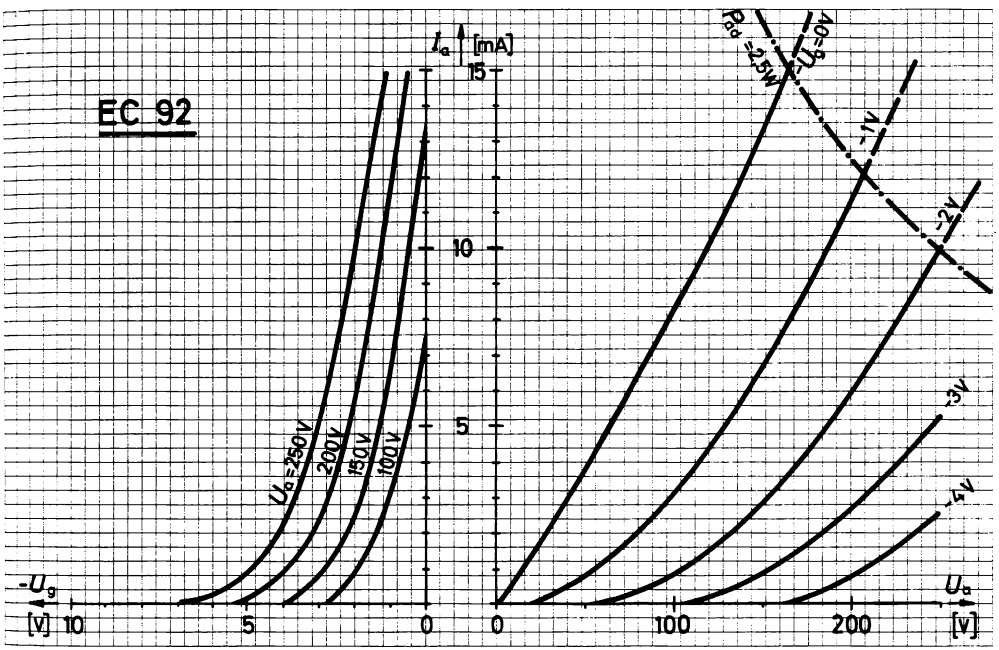


Figure 300

e. Caractéristiques des tubes

La pente S

La *pente S* est une mesure de l'effet de commande de la grille, par sa tension, sur le courant anodique. Elle est déterminée par le rapport de la variation du courant d'anode à la variation de la tension grille. Techniquement elle s'évalue en mesurant la variation de courant anodique ΔI_a provoquée par la variation de tension grille ΔU_g. La pente est le quotient de ces deux valeurs.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \; ; \; [S] = \text{mA/V} \qquad U_a = \text{constante}$$

L'unité de mesure la plus employée pour la pente est le milliampère par volt. Pour chaque point de fonctionnement, le long de la caractéristique $I_a - U_g$, la pente de la lampe s'obtient à partir de la tangente à ce point.

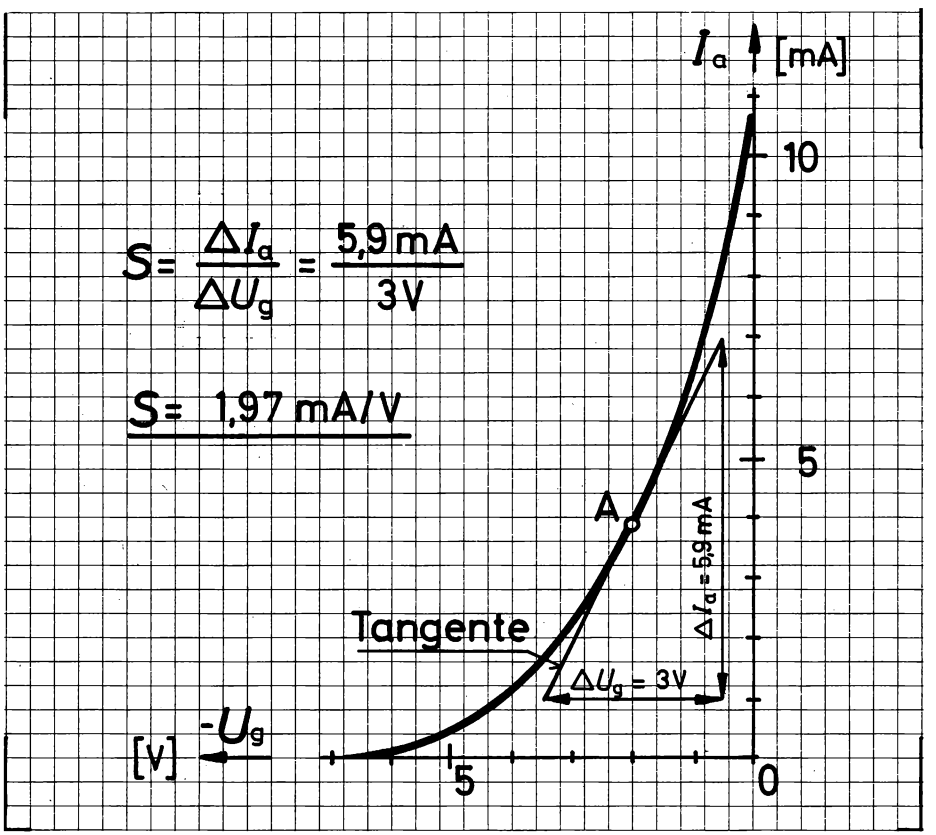


Figure 301

Le plus souvent, la pente est déterminée graphiquement en traçant la tangente au point de fonctionnement qui nous intéresse sur la caractéristique. La figure 301 montre la détermination graphique de la pente pour le point de fonctionnement A.
La pente est une valeur très importante, elle influence l'amplification que le tube permet d'atteindre.

La transparence de grille D

Le courant anodique dépend de la tension d'anode et de la tension de grille. La *transparence de grille D* (ou inverse du coefficient d'amplification) indique combien de fois l'effet de commande de la tension anodique sur le courant d'anode est plus petit que celui de la tension de grille. Techniquement, la transparence de grille est estimée en mesurant de quelle quantité la tension anodique doit être variée pour une tension de grille constante.

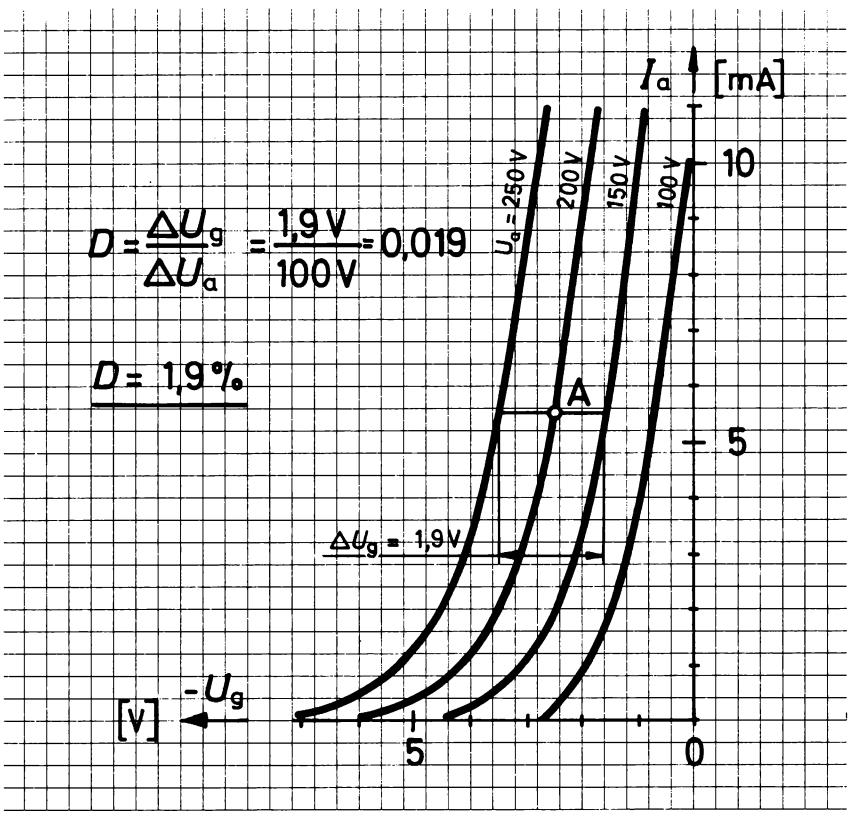


Figure 302

La variation du courant anodique qui apparaît est compensée par une correction adéquate de la tension de grille. Le rapport entre la variation de la tension de grille et celle de la tension d'anode donne la transparence de grille.

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot 100 \quad [D] = \% \qquad I_a = \text{constante}$$

La transparence de grille peut s'évaluer graphiquement à partir de la caractéristique $I_a - U_g$. Si la transparence de grille doit être évaluée pour une tension de grille et d'anode déterminées on trace une droite horizontale qui coupe le point de fonctionnement choisi sur la caractéristique $I_a - U_g$ et les caractéristiques voisines. La droite horizontale signifie que le courant anodique est maintenu constant. Les variations de tension d'anode et de grille se lisent directement sur la caractéristique. La figure 302 montre un exemple d'évaluation graphique de la transparence de grille.
La transparence de grille est indiquée en pour-cent.

Le coefficient d'amplification μ, nommé aussi coefficient d'amplification à vide.
Le *coefficient d'amplification* est l'inverse de la transparence de grille. Il donne l'amplification à vide du tube.

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \qquad I_a = \text{constante}$$

Le produit de la tension alternative de grille par le coefficient d'amplification donne la F.E.M. du tube. Cette F.E.M. se comporte exactement comme celle d'une batterie qui, dès qu'elle est chargée par une résistance, s'abaisse à la valeur de la tension aux bornes.
Le coefficient d'amplification est un nombre sans dimension.

La résistance interne R_i
Lorsque, tout en maintenant la tension de grille constante, la tension anodique est modifiée, il en résulte une variation du courant d'anode. Le quotient de la variation de tension anodique par la variation du courant d'anode a pour résultat la *résistance interne du tube* R_i, comme pour la diode. Cette résistance caractérise la *résistance interne en courant alternatif.* Il ne faut pas la confondre avec la résistance en courant continu qui, comme pour la diode, résulte du quotient de la tension anodique par le courant anodique pour un point de fonctionnement déterminé. La mesure technique de la résistance interne s'effectue en maintenant constante la tension de grille et en variant la tension anodique d'une quantité ΔU_a. La variation de courant anodique qui en résulte ΔI_a en relation avec la variation de tension anodique a pour résultat la valeur de la résistance interne.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}; \; [R_i] = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega \qquad U_g = \text{constante}$$

L'unité de mesure de la résistance interne est l'ohm.
La résistance interne est déterminée graphiquement à partir de la famille des courbes caractéristiques $I_a - U_a$. On trace la tangente au point de fonctionnement sur la caractéristique. La valeur de la résistance interne est donnée par la pente de la tangente. La figure 303 montre comment déterminer graphiquement la résistance interne d'un tube.

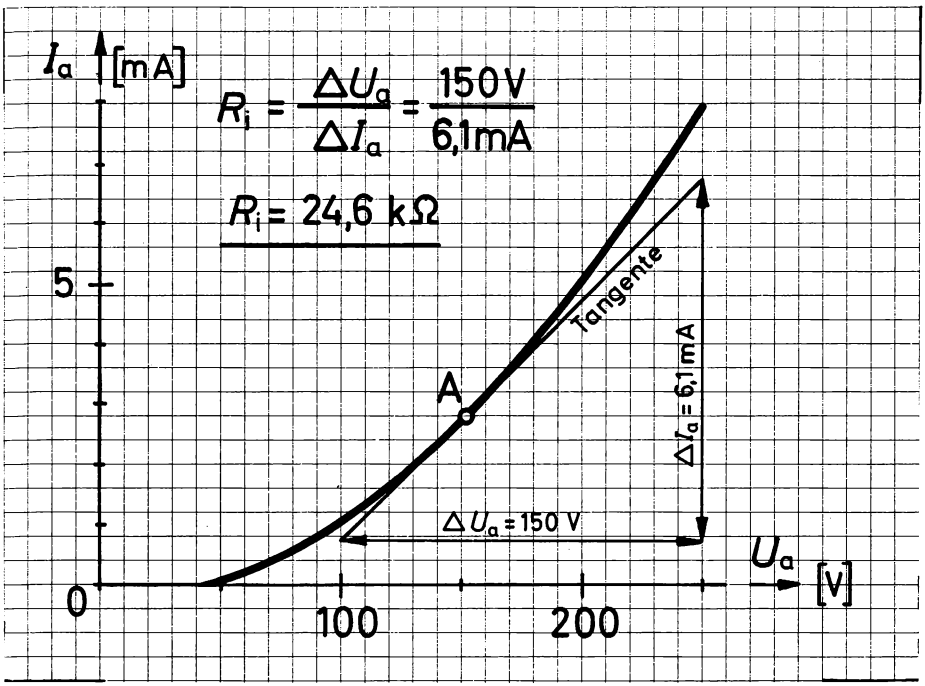


Figure 303

L'équation de Barkhausen

L'équation de Barkhausen, concernant les tubes, montre la relation entre les caractéristiques du tube.

$$S \cdot D \cdot R_i = 1$$

Cette équation n'est valable que si toutes les caractéristiques du tube se rapportent au *même point de fonctionnement.* Par point de fonctionnement de la triode il faut entendre un point quelconque défini par la tension d'anode et de grille.
L'exactitude de l'équation de Barkausen se vérifie aisément en remplaçant S, D et R_i par leurs valeurs correspondantes.

4. Exemple

Déterminer les caractéristiques statiques pour un point de fonctionnement donné du tube EC 92 (triode) à partir de son réseau de courbes caractéristiques.

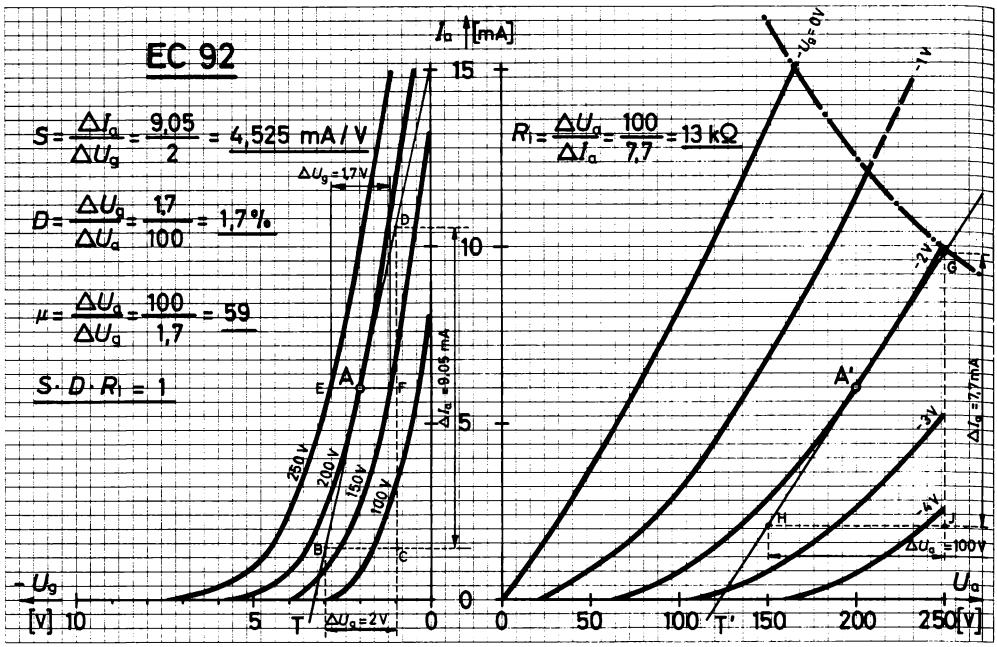


Figure 304

Marche à suivre:

Première étape : situer le point de fonctionnement

- le point de fonctionnement doit, autant que possible, se trouver sur la partie linéaire des courbes caractéristiques $I_a - U_g$;
- le point de fonctionnement $U_a = 200$ V, $U_g = -2$ V remplit cette condition. Le point A pour $U_g = -2$ V est projeté sur la caractéristique $I_a - U_a$: on trouve A'.

Deuxième étape : déterminer la pente S

- *tracer la tangente au point A de la caractéristique* $I_a - U_g$ de 200 V ;
- sur l'axe U_g élever des perpendiculaires aux valeurs de -3 V et -1 V jusqu'à ce qu'elles coupent la tangente aux points B et D. La droite $\overline{BC}$ correspond à la variation de tension de grille et $\overline{CD}$ représente la variation de courant anodique.

– lire les valeurs

$$\Delta U_g = 2\ \text{V}$$
$$\Delta I_a = 9{,}05\ \text{mA}$$

– écrire la formule de base donnant S

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$S = \frac{9{,}05}{2}\ \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$
$$S = \mathbf{4{,}525\ mA/V}$$

Troisième étape : calcul de la transparence de grille D

– tracer une droite horizontale passant par le point de fonctionnement A. La droite $\overline{EF}$ correspond à la variation de tension grille. La variation de tension anodique résulte de la différence entre les deux courbes caractéristiques d'anode pour 150 V et 250 V.

– lire les valeurs

$$\Delta U_g = 1{,}7\ \text{V}$$
$$\Delta U_a = 100\ \text{V}$$

– écrire la formule de base donnant D

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot 100$$

– introduire les valeurs et calculer

$$D = \frac{1{,}7}{100} \cdot 100\ \frac{\text{V}}{\text{V}} \cdot \%$$
$$D = \mathbf{1{,}7\%}$$

Quatrième étape : calcul du coefficient d'amplification μ

– écrire la formule de base donnant μ

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$\mu = \frac{100}{1{,}7}\ \frac{\text{V}}{\text{V}}$$
$$\mu = \mathbf{59}$$

Cinquième étape : calcul de la résistance interne R_i

– tracer la tangente T′ au point de fonctionnement A′ sur la caractéristique $I_a - U_a$

– élever deux droites verticales depuis les valeurs 150 V et 250 V sur l'axe U_a jusqu'à ce qu'elles coupent la tangente T′ aux points G et H. Tracer une droite horizontale passant par le point H. La distance $\overline{HJ}$ correspond à la variation de tension anodique et la droite $\overline{JG}$ donne la variation de courant anodique correspondante.

– lire les valeurs

$$\Delta U_a = 100\ \text{V}$$
$$\Delta I_a = 7{,}7\ \text{mA}$$

– écrire la formule de base donnant R_i

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$R_i = \frac{100}{7{,}7 \cdot 10^{-3}}\ \frac{\text{V}}{\text{A}}$$
$$R_i = \mathbf{13\ k\Omega}$$

Sixième étape : contrôle des résultats avec la formule de Barkhausen

– écrire la formule $S \cdot D \cdot R_i = 1$

– introduire les valeurs et calculer $4{,}525 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-2} \cdot 13 \cdot 10^{3} = 1$

$$[SDR_i] = \frac{A}{V} \cdot \frac{V}{V} \cdot \frac{V}{A} = 1$$

5. L'essentiel

Les électrodes de la triode sont : la cathode, la grille et l'anode. Le courant anodique peut être commandé sans perte de puissance en variant la tension de la grille.

L'effet de commande de la grille est représenté par le réseau des courbes $I_a - U_g$. Chaque courbe caractéristique $I_a - U_g$ est valable pour une valeur donnée et constante de la tension anodique.

L'influence de la tension anodique est visualisée par la caractéristique $I_a - U_a$. Une tension de grille déterminée est liée à chaque caractéristique $I_a - U_a$. Les caractéristiques du tube peuvent être trouvées d'après ses courbes.

La pente du tube est une mesure indiquant l'effet de commande de la grille sur le courant anodique. Elle correspond à la pente de la tangente passant par le point de fonctionnement de la caractéristique $I_a - U_g$. La pente résulte du quotient de la variation de courant anodique par la variation de tension de grille.

La transparence de grille indique combien de fois l'effet de commande de la tension anodique sur le courant d'anode est plus petit que celui de la tension grille. La transparence de grille est d'autant plus petite que les courbes caractéristiques $I_a - U_g$ sont rapprochées (serrées). Elle s'obtient en faisant le quotient de la variation de tension grille par la variation de tension anodique pour un courant d'anode constant.

Le coefficient d'amplification indique le gain à vide du tube. Il correspond à l'inverse de la transparence de grille.

La résistance interne est la résistance en courant alternatif du tube. Sa valeur est déterminée par la pente de la tangente, passant par le point de fonctionnement sur la caractéristique $I_a - U_a$. Elle résulte du quotient de la variation de tension anodique par la variation du courant d'anode.

L'équation de Barkhausen nous montre que le produit de la pente par la résistance interne et par la transparence de grille d'un tube, pour un point de fonctionnement a toujours 1 pour résultat.

6. Exercices de répétition (solutions page 483)

a) Pourquoi seule la partie négative de la caractéristique $I_a - U_g$, de la triode, est-elle utilisée pour la commande du courant anodique ?

b) Selon la figure 305, déterminez la pente de la triode pour une tension négative de grille de – 1 V.

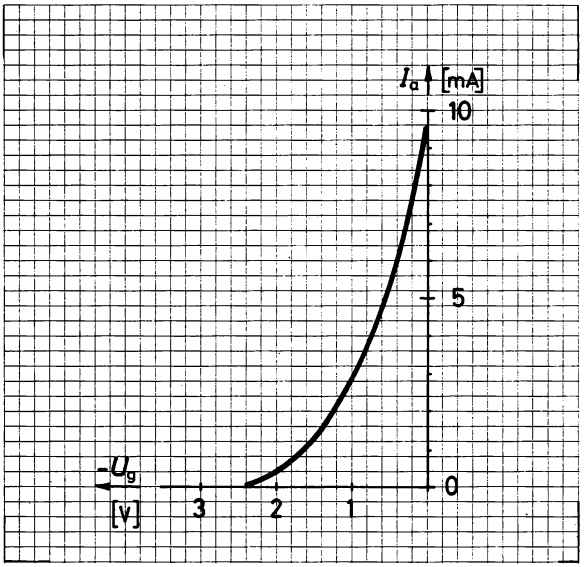


Figure 305

c) Définissez la notion de « pente ».
d) Selon la figure 306, déterminez la transparence de grille du tube pour une tension de grille de – 2 V sur la caractéristique de 150 V.

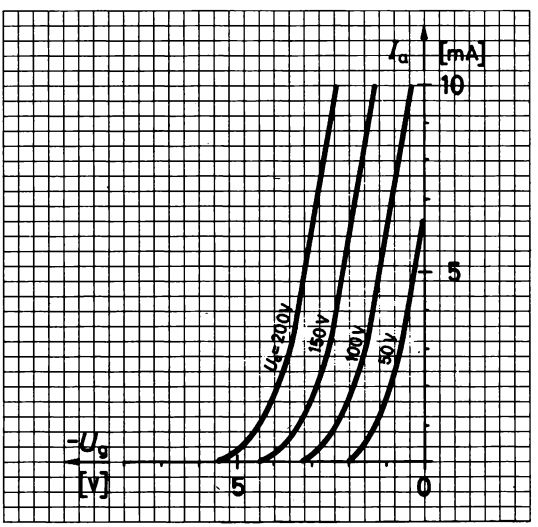


Figure 306

e) Quelle est la valeur du coefficient d'amplification du tube de l'exercice d ?
f) Déterminez, d'après la caractéristique de la figure 307, la résistance interne du tube pour une tension anodique de 150 V.

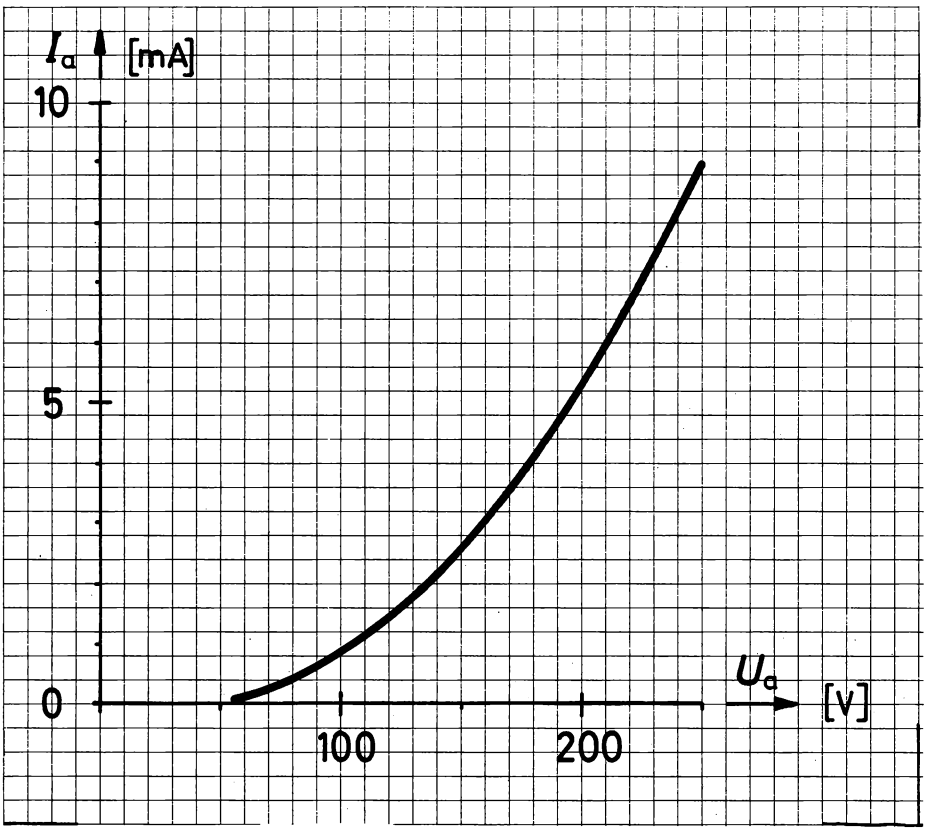


Figure 307

g) Le coefficient d'amplification d'une triode est de 40 et sa résistance interne de 15 kΩ. Quelle est la pente du tube ?
h) Démontrez l'exactitude de l'équation (ou formule) de Barkhausen.
i) Nommez les principaux domaines d'utilisation des triodes.

III. La pentode

1. Introduction

La triode présente quelques inconvénients. Ainsi, avant tout, la grande influence de la tension anodique sur le courant d'anode a un effet défavorable dans les circuits amplificateurs. La grande capacité entre l'anode et la grille provoque des oscillations indésirables dans les amplificateurs haute fréquence. Un nouveau type de tube, la *tétrode*, fut développé qui présentait une transparence de grille beaucoup plus faible, une plus grande résistance interne et une capacité grille-anode beaucoup plus petite. La tétrode est un tube dans lequel une grille supplémentaire est montée entre la grille de commande et l'anode. Cette *grille écran* est portée à un potentiel positif, ce qui a pour effet de réduire considérablement l'influence de la tension anodique sur le courant d'anode. En revanche, la courbe caractéristique $I_a - U_a$ de la tétrode présente un « coude » ou « creux » ; à l'intérieur d'une zone déterminée le courant anodique baisse malgré l'élévation de la tension d'anode. La figure 308 montre cette caractéristique particulière.

Figure 308

Ce coude indésirable est éliminé dans les *pentodes* par l'introduction d'une troisième grille entre la grille écran et l'anode. Cette grille, nommée *suppresseuse, de freinage* ou *d'arrêt*, se trouve le plus souvent au même potentiel que la cathode.
La pentode est le tube amplificateur le plus utilisé. Grâce à ses excellentes propriétés amplificatrices elle est utilisée aussi bien pour les signaux de basse que de haute fréquence.
Dans certains appareils spéciaux, la pentode est utilisée comme générateur et amplificateur d'impulsions ou amplificateur de tension continue. Ses propriétés permettent également de l'employer dans les étages mélangeurs.

2. Que savez-vous au sujet de la pentode?
(solutions page 486)

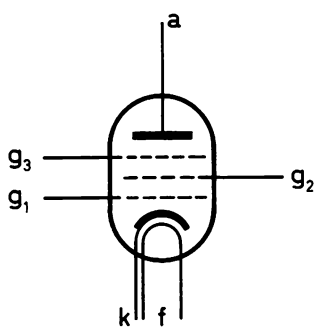
a) Combien la pentode a-t-elle d'électrodes?
b) Dans une pentode, quelles sont les caractéristiques qui divergent notablement par rapport à celles de la triode?
c) Quelles sont les conséquences, pour la pentode, de la transparence de grille qui est notablement plus faible en relation avec l'amplification?
d) Comment se présente le réseau des courbes caractéristiques $I_a - U_a$ de la pentode puisque sa résistance interne est notablement plus grande que celle de la triode?
e) Comment la transparence de grille, bien plus petite, de la pentode influence-t-elle le réseau des courbes caractéristiques $I_a - U_g$?

3. La pentode

a. Définition

La *pentode* est un tube multigrille. Elle possède cinq électrodes: la cathode, la grille de commande (g_1), la grille écran (g_2), la grille suppresseuse (g_3) et l'anode. Grâce à son petit coefficient de pénétration d'anode et à sa grande résistance interne, la pentode présente d'excellentes propriétés amplificatrices.

b. Symbole



a = anode
k = cathode
f = chauffage
g_1 = grille de commande
g_2 = grille écran
g_3 = grille suppresseuse

Figure 309

c. Construction

La différence entre la construction de la triode et celle de la pentode réside dans le fait que, pour cette dernière, une grille écran et une grille suppresseuse sont disposées entre la grille de commande et l'anode. La figure 310 montre la disposition des électrodes d'une pentode.

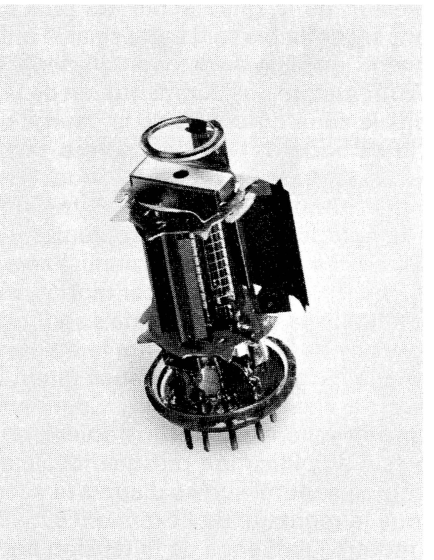


Figure 310

d. Fonctionnement

Si, entre la grille de commande et l'anode d'une triode, on place une électrode supplémentaire nommée grille écran, un nouveau type de tube est créé: la *trétode*. La grille écran est reliée à un potentiel positif constant. Cette mesure diminue considérablement la rétroaction de la tension anodique sur son propre courant. Par rapport à la cathode, la grille écran assume une fonction semblable à celle de l'anode: elle accélère les électrons. Une partie des électrons frappe le treillis de la grille écran et provoquent le courant de grille écran. Cependant, la plus grande part de ces électrons passe à travers les mailles de la grille écran et atteignent l'anode, ce qui assure ainsi le courant anodique. La tension anodique peut varier dans de grandes limites sans que cela se répercute sur le courant d'anode. Formulé en d'autres termes, cela signifie – par rapport à la triode – une diminution notable du coefficient de pénétration d'anode et une augmentation remarquable de la résistance interne. Simultanément, la capacité grille-anode diminue car la grille écran a un effet de blindage et protège la grille de commande des lignes du champ électrique de l'anode.

La caractéristique $I_a - U_a$ de la tétrode présente le coude indésirable dont nous avons déjà parlé. Celui-ci est provoqué par l'*effet électronique secondaire.* Lorsque la tension anodique est suffisante, l'énergie des électrons qui tombent sur l'anode est si grande que d'autres électrons sont arrachés de la tôle de l'anode: ce sont les *électrons secondaires.*

Si, maintenant, la tension de la grille écran est plus élevée que la tension anodique ces électrons secondaires sont captés par la grille écran et s'écoulent à travers elle. Le courant anodique est diminué de la valeur de ce *courant électronique secondaire* : malgré une augmentation de la tension d'anode, son courant diminue. Dans la zone du coude de la courbe caractéristique le tube se comporte, entre la cathode et l'anode, comme une *résistance négative*. Cet effet indésirable peut être éliminé par l'introduction d'une grille entre la grille écran et l'anode. Cette *grille dite « suppresseuse » ou « d'arrêt »* est reliée directement à la cathode dans de nombreux tubes. Lorsque ce n'est pas le cas elle doit être reliée à la masse (potentiel zéro). Grâce au potentiel négatif que la grille suppresseuse présente par rapport à l'anode, les électrons secondaires n'atteignent plus la grille écran mais sont repoussés vers l'anode, ce qui a pour conséquence de faire disparaître le coude de la caractéristique. Par son effet de blindage, la grille suppresseuse diminue encore la capacité grille-anode par rapport à celle de la tétrode. Simultanément, le coefficient de pénétration d'anode en est encore considérablement diminué. La pentode possède des propriétés d'amplification presque idéales. Les caractéristiques techniques d'une pentode sont mesurées d'après le schéma de la figure 311 et la figure 312 indique le montage de l'expérience.
La première mesure montre l'influence de la tension anodique sur le courant d'anode. La grille écran est maintenue à une tension constante de 200 V. La tension négative de la grille de commande est réglée de telle façon que, pour une tension anodique de 200 V, le courant d'anode soit de 5 mA. Puis, la tension anodique est modifiée graduellement dans une zone allant de 100 V à 350 V tout en observant le courant anodique. Entre 100 V et 350 V,

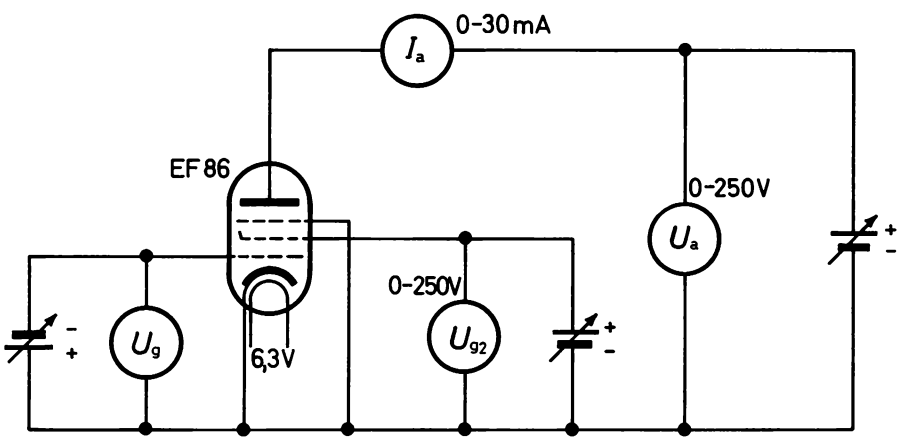


Figure 311

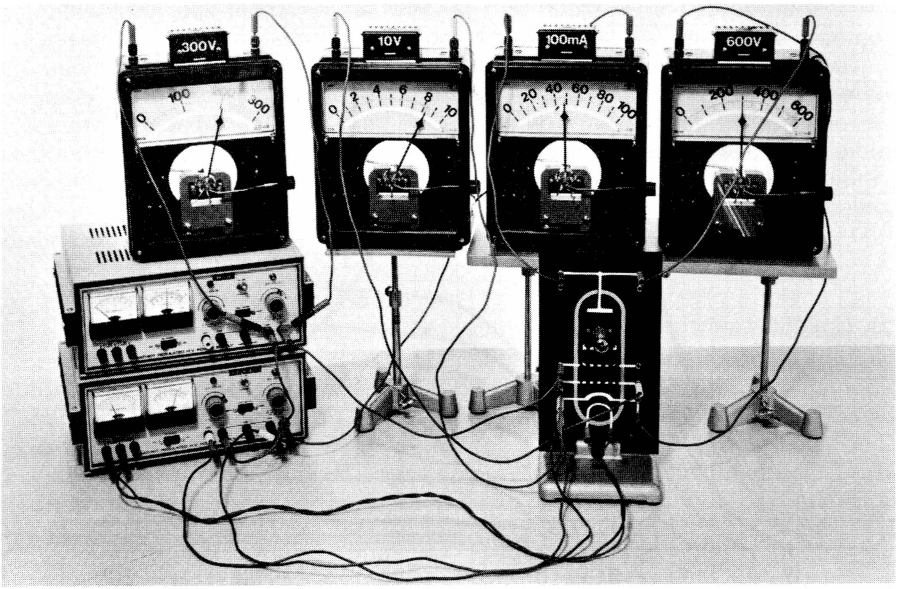


Figure 312

de la tension anodique, son courant ne varie pratiquement pas. Pour des tensions anodiques au-dessous de 100 V le courant diminue lentement et si la tension descend au-dessous de 50 V le courant s'accentue.
Nous constatons que, à l'intérieur d'une grande zone de la tension d'anode, celle-ci est sans influence sur son courant.
Au cours d'une seconde mesure, l'influence de la tension de grille écran sur le courant anodique doit être examinée. La tension anodique est réglée sur 250 V. Au début de la mesure, la tension de grille écran est de 140 V ; elle est choisie pour que le courant anodique soit à nouveau de 5 mA. Ensuite, la tension de grille écran est augmentée puis diminuée : le courant anodique suit ces variations de tension. *L'influence de la tension de grille écran sur le courant anodique est grande.*
La troisième mesure permet de relever les caractéristiques $I_a - U_g$. Pendant toute la série de mesures, la tension anodique est maintenue constante. Les courbes sont relevées pour différentes tensions de grille écran. La figure 313 montre graphiquement le résultat des mesures. La quatrième série de mesures donne les caractéristiques $I_a - U_a$ avec une tension fixe de grille écran mais pour différentes tensions de polarisation de grille (g_1). Le résultat de ces mesures est également visible sur la figure 313.

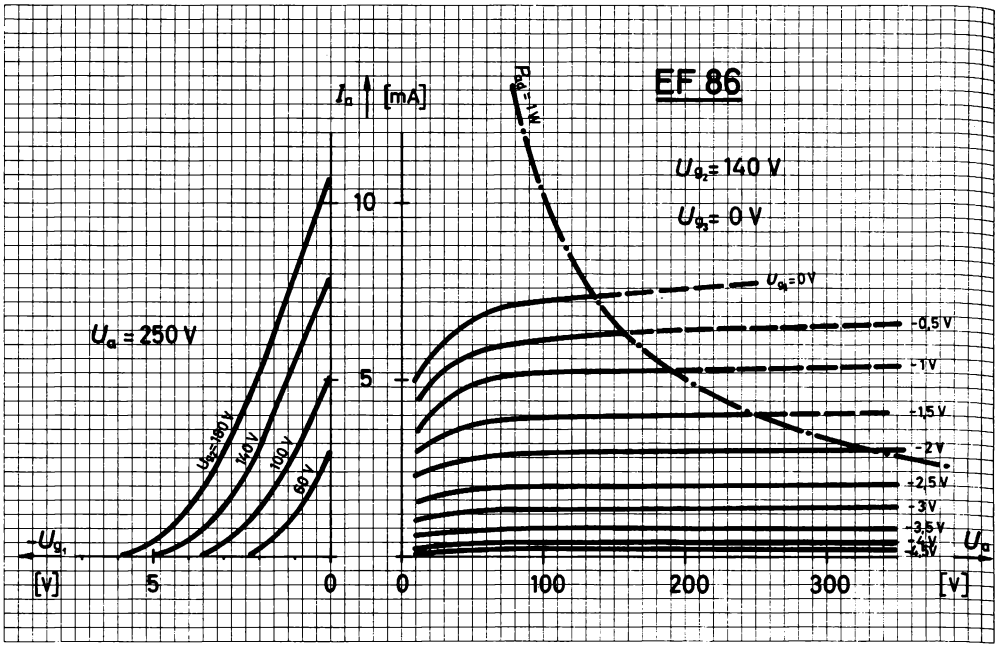


Figure 313

e. Analyse du graphique des courbes caractéristiques

L'*image des courbes caractéristiques* $I_a - U_g$ ressemble à celle de la triode mais avec cette différence que les paramètres choisis sont ceux de la tension de grille écran. Par le terme de *paramètre* on désigne une grandeur variable qui est maintenue temporairement constante (pendant la durée de la mesure). Si l'on voulait relever ces caractéristiques pour les diverses tensions anodiques, les courbes se recouvriraient presque puisque l'influence de la tension anodique sur le courant du même nom est très faible. Les courbes montrent la très grande influence de la tension de grille écran sur le courant anodique. Par conséquent, lors de l'emploi pratique des pentodes, la tension de grille écran est maintenue aussi constante que possible. Le point de fonctionnement est déterminé par les valeurs de la polarisation de grille, de la tension de grille écran et – dans une moindre mesure – de la tension d'anode.
Dans le *réseau des caractéristiques* $I_a - U_a$ le tracé plat des courbes apparaît. La résistance interne du tube est d'autant plus grande que ce tracé de la caractéristique est plat.

f. Grandeurs caractéristiques de la pentode

Pour un point de fonctionnement déterminé d'une pentode, seules la pente et la résistance interne sont intéressantes. Le plus souvent la transparence

de grille n'est pas indiquée car elle est très faible et le comportement du tube est suffisamment caractérisé par sa pente et sa résistance interne. La transparence de grille peut très bien se calculer – également pour la pentode – par la formule de Barkhausen. Les caractéristiques du tube se calculent selon les mêmes méthodes que pour la triode. La formule de Barkhausen montre que pour une grande résistance interne, liée à une faible transparence de grille, une grande amplification doit en résulter. Les amplifications obtenues avec les pentodes sont de beaucoup supérieures à celles des triodes.

g. La pentode à pente variable

La puissance sonore, que donne un récepteur, doit être indépendante de l'intensité du champ du signal reçu. L'amplification de l'appareil doit s'adapter automatiquement au signal d'entrée. Lorsque le signal reçu est fort, l'amplification des divers étages du récepteur doit être réglable électroniquement. Pour réaliser ce fonctionnement, la pentode à pente variable fut développée. En fabriquant une grille dont l'enroulement des spires est irrégulier, selon la figure 314, on obtient la caractéristique $I_a - U_g$ indiquée par la même figure.

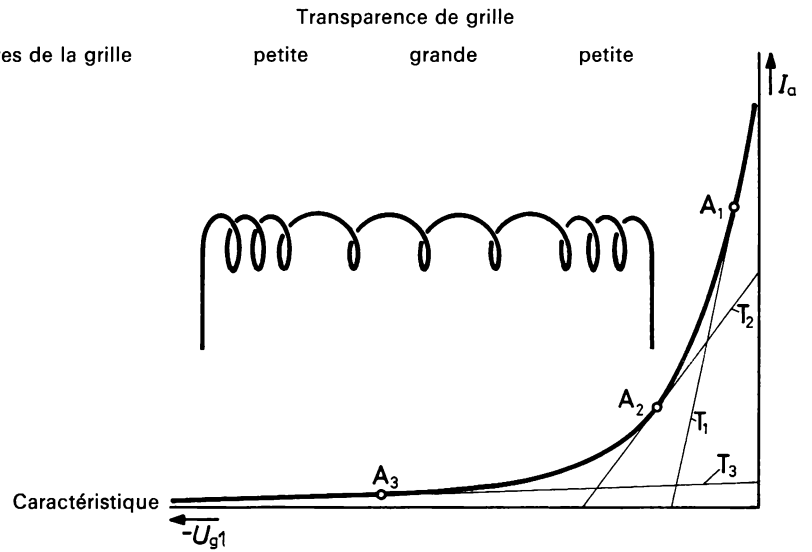


Figure 314

L'amplification obtenue est dépendante de la position du point de fonctionnement et par là de la polarisation de grille. Quand la polarisation de grille est faible, l'amplification obtenue par l'étage, grâce à une plus grande pente, est plus élevée que lorsque la polarisation est forte ce qui a pour effet de diminuer la pente du tube.

Pratiquement, des variations de pente de 1 : 100 sont courantes et cette proportion peut être encore notablement améliorée au moyen de tubes spéciaux. La commande d'un amplificateur, muni de tubes à pente variable, s'effectue en amenant une tension négative de réglage, variable et dépendante du signal d'entrée sur la grille de commande.

4. Exemple

Calculer la pente et la résistance interne pour le tube EF 86 (pentode BF), d'après ses courbes caractéristiques, pour un point de fonctionnement donné.

Marche à suivre:

Première étape : situer le point de fonctionnement (figure 315)
Le point de fonctionnement est marqué sur la caractéristique $I_a - U_{g1}$, correspondant aux tensions de 140 V pour la grille écran et 250 V pour l'anode, la polarisation de grille étant de −2 V. En effectuant la projection du point A, qui correspond à une tension de polarisation de −2 V, sur la caractéristique $I_a - U_a$ on obtient le point A'.

Deuxième étape : déterminer la pente
- Sur la caractéristique $I_a - U_g$, tracer la tangente passant par le point de fonctionnement A. Cette droite coupe les axes de I_a et U_g aux points D et B respectivement. La distance $\overline{BC}$ correspond à la variation de tension de grille et l'intervalle $\overline{CD}$ à la variation du courant anodique.
- lire les valeurs $\Delta U_{g1} = 3{,}5\ \text{V}\ ;\ \Delta I_a = 7\ \text{mA}$
- introduire ces valeurs dans la formule de la pente et calculer

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{g1}} \quad \begin{matrix} U_a \\ U_{g2,3} \end{matrix} \quad \begin{matrix} = \text{constante} \\ = \text{constantes} \end{matrix}$$

$$S = \frac{7}{3{,}5} \quad \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S = \mathbf{2\ mA/V}$$

Troisième étape : déterminer la résistance interne
- Pour la polarisation $U_{g1} = -2$ V, tracer la tangente T' au point de fonctionnement A' sur la caractéristique $I_a - U_a$. Celle-ci coupe l'axe I_a au point G et son prolongement rencontre la verticale élevée sur la valeur de la tension anodique de 300 V ce qui donne le point F.
- tracer une horizontale passant par le point F jusqu'à ce qu'elle coupe l'axe I_a.
- la distance $\overline{EF}$ correspond à la variation de tension anodique alors que l'intervalle $\overline{EG}$ représente la variation de courant anodique.

– lire les valeurs $\Delta I'_a = 0{,}12$ mA, $\Delta U_a = 300$ V

– introduire les valeurs dans la formule donnant la résistance interne et calculer

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I'_a} \quad U_{g1,2,3} = \text{constantes}$$

$$R_i = \frac{300}{0{,}12} \quad \frac{V}{mA}$$

$$R_i = 2500\ k\Omega$$

$$R_i = \mathbf{2{,}5\ M\Omega}$$

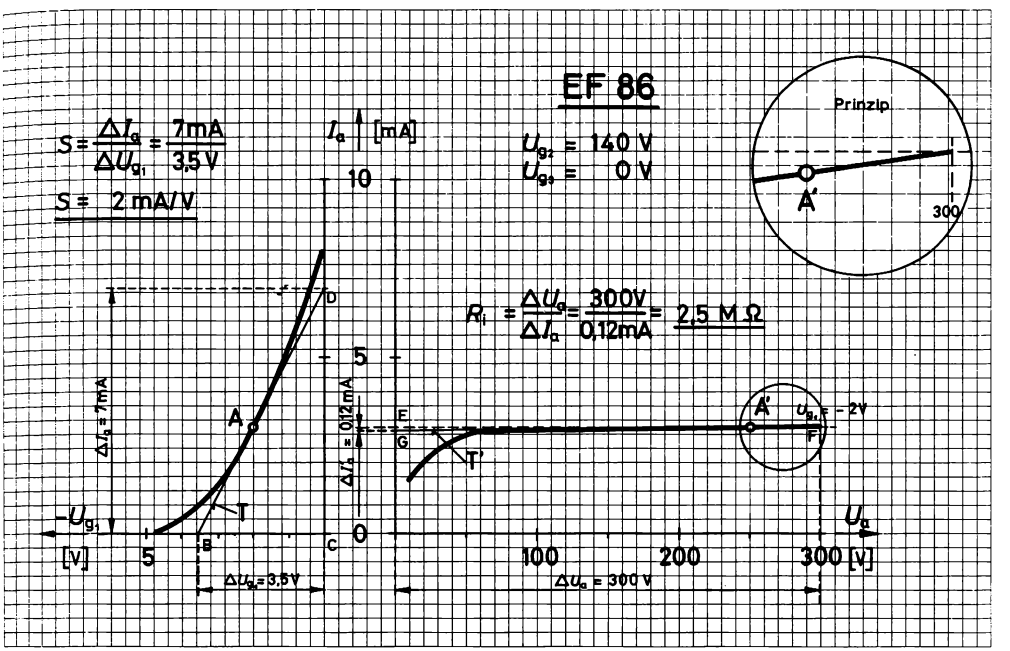


Figure 315

5. L'essentiel

La pentode se compose de 5 électrodes : cathode, grille de commande, grille écran, grille suppresseuse et anode.
La grille écran diminue considérablement l'influence de la tension anodique sur le courant d'anode ce qui a pour conséquence que la transparence de grille est bien plus faible que celle de la triode, simultanément la résistance interne augmente beaucoup.

L'influence de la tension de grille écran sur le courant anodique est très importante, c'est pour cette raison qu'elle est maintenue constante pendant le fonctionnement.
La grille suppresseuse freine les électrons secondaires provenant de l'anode et les oblige à y retourner.
Les pentodes à pente variable présentent une caractéristique $I_a - U_g$ très fortement coudée.
La pente est très dépendante de la position du point de fonctionnement. La pente et avec elle l'amplification du tube sont réglées par la variation de la polarisation de grille.
La faible transparence de grille et la très grande résistance interne font de la pentode un élément d'amplification idéal.
La grille écran et la grille suppresseuse provoquent une très forte réduction de la capacité nuisible (interne) entre la grille et l'anode. Pour les pentodes, cette dernière est si faible qu'elle peut être négligée dans la plupart des cas.

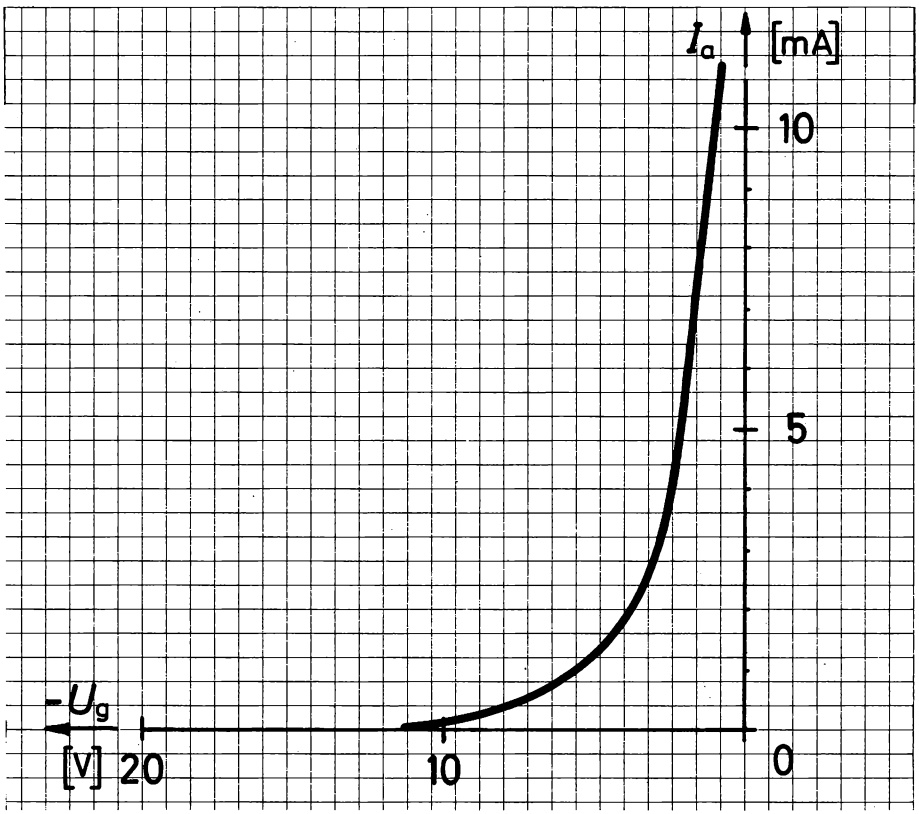


Figure 316

6. Exercices de répétition (solutions page 487)

a) Quels sont les avantages que présente la pentode par rapport à la triode ?
b) Pourquoi la tension de grille écran doit-elle être maintenue constante lorsque la pentode est en fonctionnement ?
c) Pourquoi, dans une pentode, l'influence de la tension anodique sur le courant d'anode est-elle faible ?
d) Quel est, normalement, le potentiel de la grille suppresseuse ?
e) Quel est le rôle de la grille suppresseuse ?
f) Esquissez la courbe caractéristique $I_a - U_g$ d'une pentode à pente variable et expliquez à grands traits comment fonctionne ce tube.
g) Où les pentodes à pente variable sont-elles principalement utilisées ?
h) Pourquoi la pentode est-elle particulièrement indiquée comme tube amplificateur ?
i) La figure 316 montre la caractéristique $I_a - U_g$ d'une pentode à pente variable : déterminez les pentes $S_1 - S_2$ pour les polarisations de grille de – 2 V et – 8 V.
k) Esquissez l'allure du réseau des courbes caractéristiques $I_a - U_a$ d'une pentode et expliquez leur influence sur les données concernant le tube.

IV. La pentode de puissance

1. Introduction

La pentode de puissance est souvent utilisée dans les étages amplificateurs basse fréquence de sortie où le tube précité doit fournir une puissance basse fréquence déterminée. Si la pentode se trouve dans l'étage final d'amplification haute fréquence d'un émetteur elle doit pouvoir fournir la puissance d'émission requise. Pour produire un puissant courant alternatif, il est nécessaire de fournir au tube final, outre une tension anodique élevée mais encore un courant anodique adéquat. La puissance délivrée détermine, par conséquent, la grandeur du tube. Plus la tension et le courant anodiques choisis sont élevés, d'autant plus grandes sont les dimensions de la cathode et de l'anode. Le principe du fonctionnement d'une pentode de puissance correspond à celui d'une pentode ordinaire, seules les caractéristiques du tube sont différentes.

2. Que savez-vous au sujet des pentodes de puissance? (solutions page 489)

a) Par quoi les caractéristiques d'une pentode de puissance se différencient-elles de celles de son homologue ordinaire ?
b) Existe-t-il une différence entre le tracé des caractéristiques $I_a - U_a$ d'une pentode de puissance et celui d'une pentode normale ?
c) Qu'entendez-vous par le terme « puissance de dissipation d'anode » ?
d) Pourquoi les tubes finals nécessitent-ils une plus grande puissance de chauffage que les tubes amplificateurs ordinaires ?
e) Pourquoi aucune triode n'est-elle pratiquement plus utilisée comme tube amplificateur de puissance ?
f) Pourquoi la notion de puissance de dissipation d'anode joue-t-elle un rôle particulièrement important pour un tube final ?

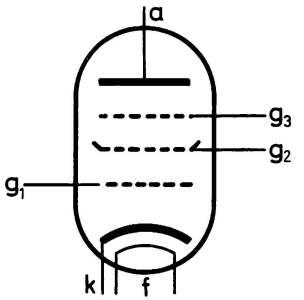
3. La pentode de puissance

a. Définition

La *pentode de puissance* est un tube amplificateur qui est utilisé en dernier pour procurer le gain de puissance d'un amplificateur. Etant donné les valeurs importantes de la tension d'anode et de son courant, le tube amplificateur de puissance se différencie du tube amplificateur de tension.

b. Symbole

Le symbole du tube amplificateur de puissance est le même que celui du tube amplificateur de tension. Dans les schémas, la différence entre les tubes amplificateurs de puissance et de tension se fait au moyen de la désignation du type de tube.



a = anode
g_3 = grille suppresseuse
g_2 = grille écran
g_1 = grille de commande
k = cathode
f = chauffage

Figure 317

c. Construction

En principe, la pentode de puissance est construite de la même manière que la pentode ordinaire. La grandeur des électrodes du tube est déterminée par la puissance de dissipation d'anode. Plus cette puissance est élevée, d'autant plus grandes sont les dimensions des électrodes. La figure 318 montre une pentode de puissance pour des étages de sortie basse fréquence. Sur la photo de la figure 319 on voit le tube final d'un émetteur de puissance moyenne.

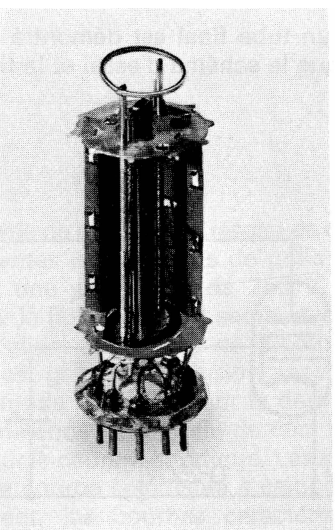


Figure 318

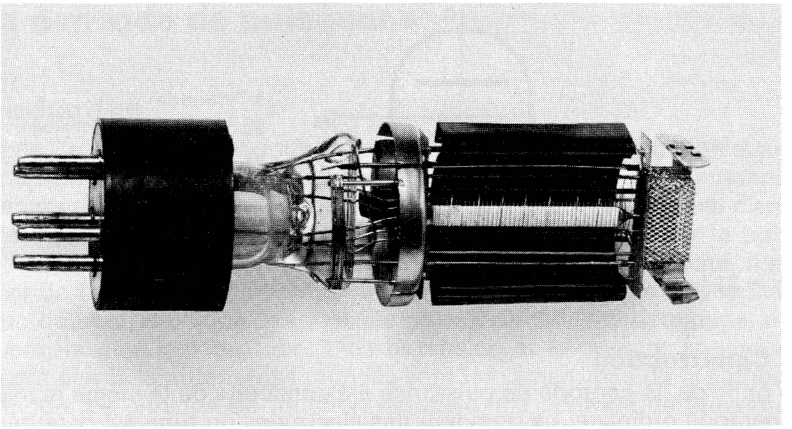


Figure 319

d. Fonctionnement

Le fonctionnement d'un tube final est démontré par l'expérience suivante. La figure 320 en indique le schéma d'essai et la figure 321 la réalisation du montage.

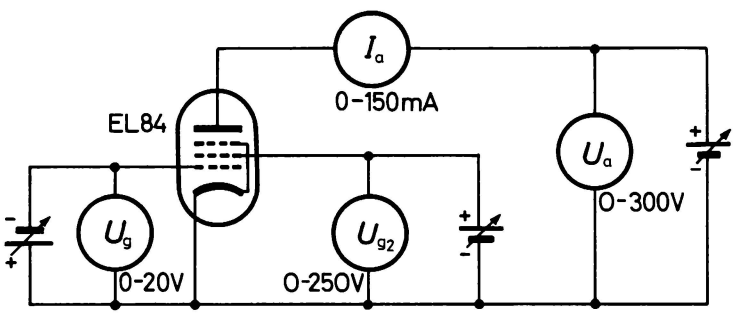


Figure 320

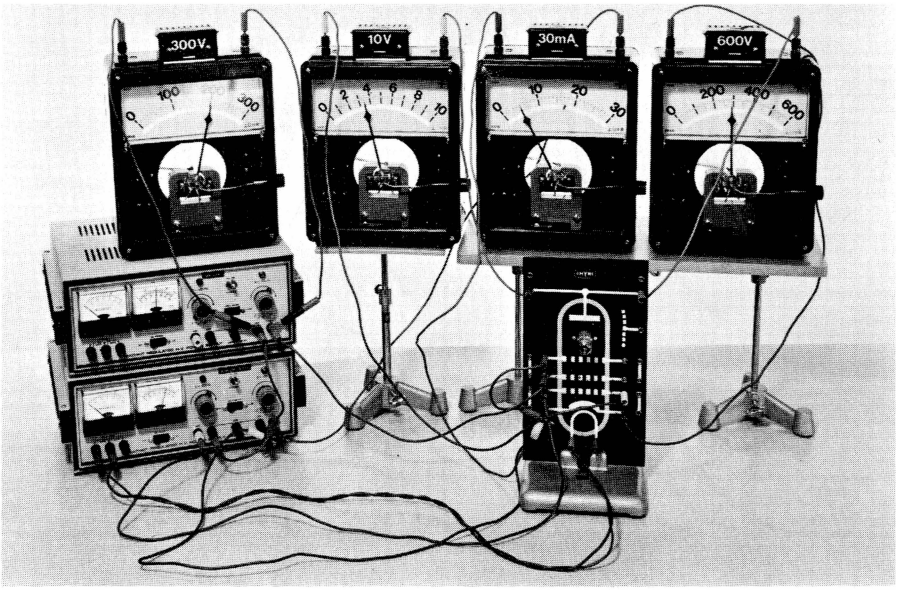


Figure 321

Au cours de la première série de mesures, le réseau de caractéristiques $I_a - U_a$ est recherché pour différentes polarisations de grille tout en maintenant la tension de grille écran à une valeur fixe de 250 V. Le tracé des courbes caractéristiques donné par la figure 322 est semblable à celui d'une pentode amplificatrice ordinaire. L'allure assez plate de la courbe permet de conclure que la résistance interne est grande ; la tension anodique n'a que peu d'influence sur le courant d'anode. En effectuant la deuxième série de mesures on examine l'effet de commande de la grille de commande et l'influence de la tension de grille écran sur le courant anodique. Les résultats de ces mesures donnent aussi un tracé de courbe semblable à celui d'un tube amplificateur de tension. Ici, également, les courbes caractéristiques permettent de reconnaître la grande influence de la tension de grille écran sur le courant anodique.

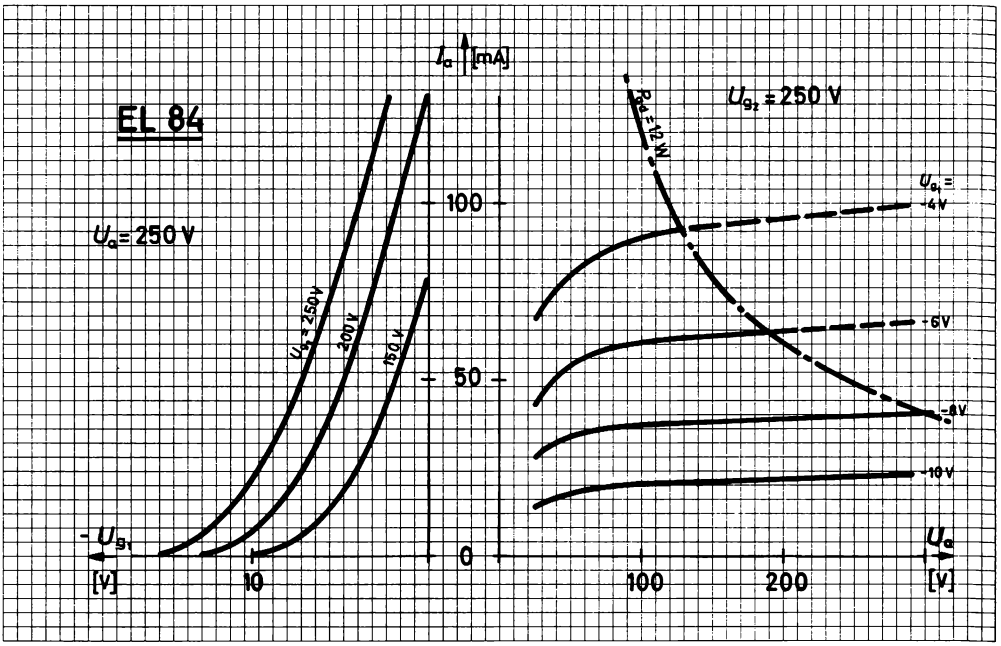


Figure 322

e. Caractéristiques de la pentode de puissance

La pente et la résistance interne de la pentode de puissance sont aussi deux grandeurs importantes mais, de plus, il faut connaître la puissance maximale admissible de la dissipation anodique car c'est d'elle que dépend la puissance du courant alternatif de sortie.

4. Exemple

Déterminer la pente et la résistance interne de la pentode finale EL 84, pour un point de fonctionnement déterminé, d'après ses courbes caractéristiques.

Marche à suivre:

Première étape : situer le point de fonctionnement
Le point de fonctionnement doit se trouver au-dessous de l'*hyperbole de dissipation de puissance maximale* afin que la puissance de dissipation d'anode ne soit pas dépassée.

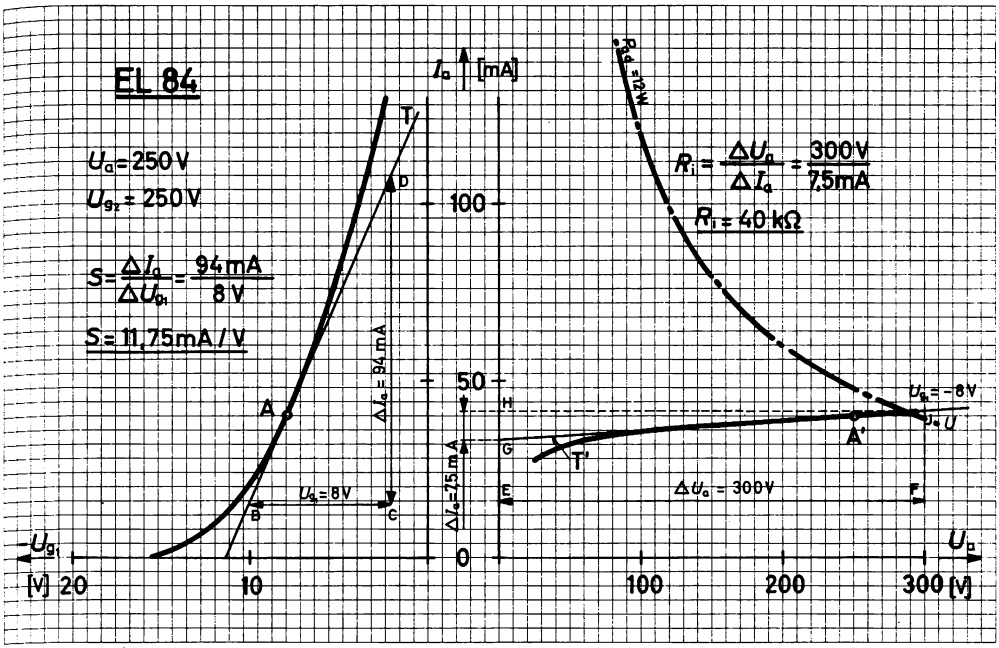


Figure 323

Pour obtenir une puissance du courant alternatif aussi élevée que possible, la puissance de dissipation d'anode doit être mise à contribution jusqu'à la limite. Dans notre exemple, les tensions d'anode et de grille écran sont fixées à 250 V. Nous choisissons le point de fonctionnement pour une polarisation de grille de −8 V, ce qui nous permet de rester légèrement au-dessous de l'hyperbole de puissance maximale.

Deuxième étape : évaluer la pente *S*
La pente *S*, au point de fonctionnement A, est déterminée graphiquement en traçant la tangente à ce point. La distance $\overline{BC}$ correspond à la variation de tension de grille et la variation du courant anodique est représentée par la distance $\overline{CD}$.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$$

$$S = \frac{94}{8} \quad \frac{mA}{V}$$

$$S = \mathbf{11{,}75\ mA/V}$$

Troisième étape : déterminer la résistance interne R_i
La résistance interne au point de fonctionnement A′ est donnée par la pente de la tangente T′. Elle correspond à la valeur réciproque (inverse) de la pente de la tangente. La variation de tension anodique est donnée par la droite $\overline{EF}$ et la variation de courant d'anode par la distance $\overline{GH}$.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad U_{g1,2,3} = \text{constantes}$$

$$R_i = \frac{300}{7{,}5 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{V}{A}$$

$$R_i = \mathbf{40\,k\Omega}$$

5. L'essentiel

Extérieurement, les tubes finals de puissance se distinguent par leur grandeur des tubes amplificateurs de tension. La cathode et l'anode doivent avoir une plus grande surface afin d'assurer les courants et les tensions anodiques plus élevés qu'ils doivent fournir.
L'allure des courbes caractéristiques de la pentode de puissance a la même forme que celle de la pentode amplificatrice de tension.
Les courants anodiques plus élevés impliquent une plus faible résistance interne.
La pentode finale peut fournir une puissance alternative dont la grandeur dépend de la puissance admissible de dissipation d'anode et par conséquent des dimensions du tube.
Dans les pentodes de sortie, le maintien de la puissance admissible de la dissipation maximale d'anode est particulièrement important car des surcharges peuvent provoquer une destruction rapide du tube.

6. Exercices de répétition (solutions page 490)

a) Pourquoi la résistance interne des pentodes de puissance est-elle notablement plus faible que celle des pentodes amplificatrices de tension ?
b) Pourquoi le point de fonctionnement des tubes de puissance doit-il être choisi au-dessous ou, tout au plus, sur l'hyperbole de puissance ?
c) Comment l'hyperbole de puissance est-elle déterminée graphiquement ?
d) Définissez l'expression « puissance de dissipation d'anode ».
e) Quelle est la fonction principale de la pentode de puissance ?
f) Nommez deux domaines d'utilisation des pentodes de puissance.

V. Le tube mélangeur

1. Introduction

Dans les circuits des émetteurs et des récepteurs, deux fréquences différentes doivent souvent être mélangées l'une avec l'autre. Un mélange ne peut s'effectuer qu'avec un élément non linéaire. Puisque les courbes caractéristiques des tubes sont coudées, ceux-ci sont tout désignés pour les étages mélangeurs. Par conséquent, des tubes ou des transistors sont très souvent utilisés dans les circuits mélangeurs. Le plus souvent, les tubes mélangeurs sont des multigrille.

2. Que savez-vous au sujet des tubes mélangeurs ? (solutions page 491)

a) Une triode peut-elle être utilisée comme tube mélangeur ?
b) A part la tétrode et la pentode, connaissez-vous d'autres tubes multigrille ?
c) Qu'entendez-vous par l'expression « tube multiple » ?
d) Quelles sont les possibilités offertes par un tube possédant plusieurs grilles de commande ?
e) Connaissez-vous le principe de fonctionnement d'un étage mélangeur ?

3. Principes de base des étages mélangeurs

a. Généralités

La compréhension du fonctionnement des tubes mélangeurs présuppose les connaissances de base relatives au mélange des fréquences. Les problèmes multiples que pose le mélange des fréquences seront traités dans un chapitre ultérieur. Ici, seules les bases absolument nécessaires sont données. A cette fin, le processus du mélange est isolé et résolu indépendamment de la technique des circuits.

b. Le processus du mélange de fréquences

Lorsque deux signaux, de fréquences différentes, sont amenés sur un élément dont la *courbe caractéristique est non linéaire* il en résulte un *mélange* de ces signaux. De nombreuses tensions alternatives dont les fréquences sont nouvelles apparaissent. Dans le produit de ce mélange, les deux fréquences originelles ainsi que la somme et la différence de ces deux signaux se distinguent nettement. La figure 324 montre très schématiquement le processus du mélange.
(Lorsque deux signaux arrivent sur un élément dont la *caractéristique est linéaire* il ne se produit pas de nouvelles fréquences mais, au contraire, les signaux s'interfèrent sous la forme d'un *battement.*)

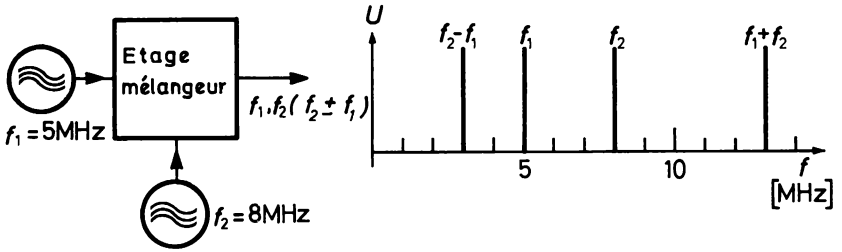


Figure 324

La somme ou la différence des deux fréquences qui entrent dans le mélangeur sont filtrées à la sortie de celui-ci au moyen d'un filtre approprié. Les rapports des amplitudes, à la sortie de l'étage mélangeur, sont très dépendantes du type de mélangeur utilisé. Les tubes multigrille sont particulièrement adaptés dans les étages mélangeurs car, dans ce cas, chaque signal d'entrée arrive sur une grille séparée. Le mélange s'opère grâce à la non-linéarité de la caractéristique du tube.

c. L'étage mélangeur d'un récepteur

Nous traiterons le principe de fonctionnement du *récepteur superhétérodyne* dans un chapitre ultérieur. Nous nous occuperons brièvement de l'étage mélangeur car la connaissance de son principe de base est nécessaire pour la compréhension du tube mélangeur. L'étage mélangeur est une partie du récepteur superhétérodyne, il se rencontre dans le plus simple des récepteurs. Dans le récepteur superhétérodyne, le signal d'entrée (venant de l'antenne) est mélangé avec le *signal produit par un oscillateur*. La *fréquence du signal de l'oscillateur* est choisie de telle sorte que le produit du mélange présente toujours une fréquence fixe : c'est la *moyenne fréquence*. L'oscillateur est un petit émetteur. Il comporte un tube ou un transistor dans un circuit couplé en générateur. La figure 325 montre, sous forme de schéma bloc les composants d'un superhétérodyne qui participent au processus du mélange.
Le signal d'entrée f_e arrive directement de l'antenne ou d'un amplificateur haute fréquence à l'entrée de l'étage mélangeur. L'oscillateur produit le signal de fréquence f_o et alimente la deuxième entrée de l'étage mélangeur, à la sortie de ce dernier nous obtenons les produits du mélange qui nous sont connus. Au moyen d'un filtre de bande, la différence de fréquence entre celle de l'oscillateur et la fréquence de réception est sélectionnée. Cette moyenne fréquence f_z est amplifiée dans l'*amplificateur moyenne fréquence* qui suit le mélangeur.

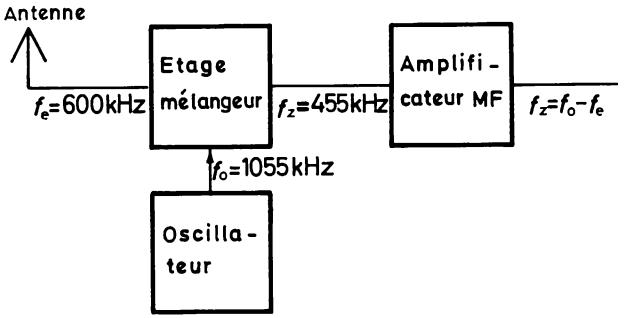


Figure 325

d. Caractéristiques des tubes mélangeurs

La pente de conversion S_c

Dans les tubes multigrille le courant anodique est commandé par deux grilles. La pente peut être indiquée pour chaque grille. Ces indications de pente sont sans intérêt, seule la pente de l'étage – pris dans son ensemble – nous intéresse. Cette pente se nomme : *pente de conversion* S_c. Elle correspond au quotient de l'amplitude du courant moyenne fréquence par l'amplitude de la tension haute fréquence d'entrée.

$$S_c = \frac{I_z}{U_{g1}}$$

S_c = pente de conversion
I_z = courant moyenne fréquence
U_{g1} = tension alternative sur la première grille

Le gain de conversion V_c

L'amplification de l'étage mélangeur est défini comme étant le *gain de conversion* V_c. Il correspond au quotient de l'amplitude de la tension moyenne par l'amplitude de la tension haute fréquence à l'entrée de l'étage.

$$V_c = \frac{U_z}{U_{g1}}$$

V_c = gain de conversion
U_z = amplitude de la tension moyenne fréquence
U_{g1} = amplitude de la tension alternative sur la première grille

La pente et le gain de conversion sont dépendants de la polarisation de la grille 1 et de l'amplitude du signal de l'oscillateur.

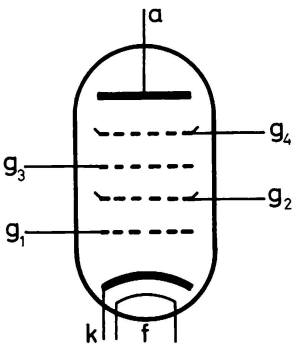
4. Les tubes mélangeurs

a. L'hexode

– Définition

L'hexode est un tube comprenant six électrodes dont quatre d'entre elles sont des grilles. Elle est utilisée comme tube mélangeur et tube à pente variable.

– Symbole



a = anode
g_4 = seconde grille écran
g_3 = seconde grille de commande
g_2 = grille écran
g_1 = grille de commande
k = cathode
f = chauffage

Figure 326

– Construction

Le système des électrodes de l'hexode se compose d'une cathode, de quatre grilles et d'une anode. Deux grilles sont des grilles de commande, les deux autres des grilles écran.
La figure 327 montre la construction d'une hexode.

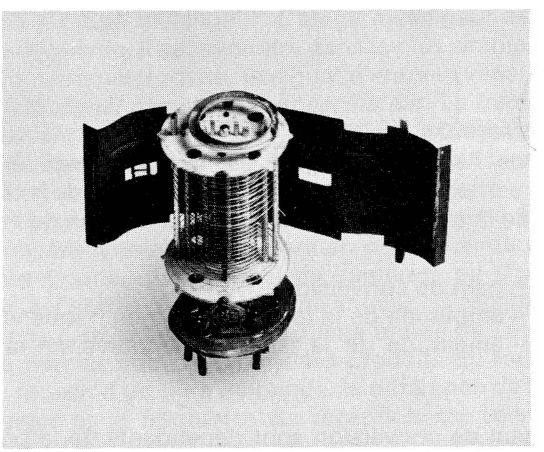


Figure 327

– Fonctionnement

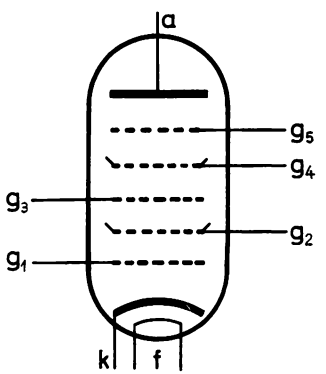
L'hexode permet de contrôler le courant anodique par deux grilles distinctes qui sont blindées électriquement l'une par rapport à l'autre. Les grilles 1 et 3 commandent le tube et le courant anodique est influencé par les deux tandis que les grilles 2 et 4 sont des grilles écran. Ces dernières sont positives par rapport à la cathode. Les grilles de commande 1 et 3 sont découplées mutuellement par la grille écran 2. Le courant total de la cathode est influencé par la tension de la première grille de commande. La seconde grille de commande g_3 règle le courant qui s'écoule vers l'anode. Si g_3 est très fortement négative seule une faible partie du courant de cathode s'écoule vers l'anode, la majeure partie de ce courant passe par g_2 et forme le courant de grille écran. Si la tension (négative) de polarisation sur g_3 est diminuée alors le courant d'anode augmente et celui qui s'écoule par g_2 diminue. *La seconde grille de commande g_3 répartit le courant cathodique sur l'anode et sur la première grille écran g_2.* C'est pour cette raison que ce procédé est appelé *commande par répartition.* La seconde grille de commande g_3 porte le nom de *grille de répartition.*

b. L'heptode

– Définition

L'*heptode* est un tube à 7 électrodes dont 5 sont des grilles. Elle est utilisée comme tube mélangeur, tube à pente variable ou comme tube convertisseur. En tant que tube convertisseur il assure deux fonctions : il produit une oscillation électrique – c'est-à-dire qu'il se comporte comme un oscillateur – et simultanément sert de tube mélangeur.

– Symbole



a = anode
g_5 = grille suppresseuse
g_4 = seconde grille écran
g_3 = seconde grille de commande
g_2 = première grille écran
g_1 = première grille de commande
k = cathode
f = chauffage

Figure 328

– Construction

L'heptode est construite de la même façon que l'hexode. Cependant, elle présente en plus une grille suppresseuse placée entre la seconde grille écran et l'anode. La figure 329 montre une heptode.

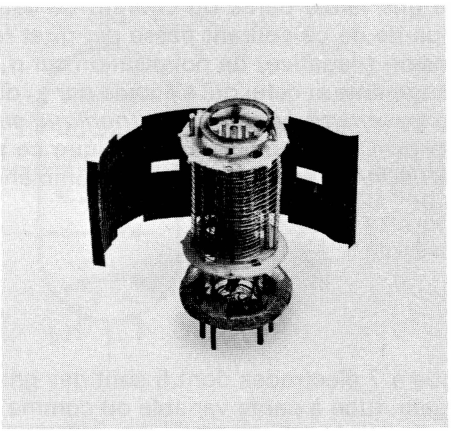


Figure 329

– Fonctionnement

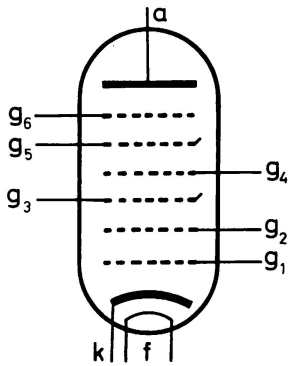
L'heptode fonctionne de la même façon que l'hexode que ce soit en tube mélangeur ou amplificateur. Grâce à la grille suppresseuse, les électrons secondaires sont repoussés sur l'anode et de ce fait le bruit du tube est abaissé.

c. L'octode

– Définition

L'octode est un tube comportant huit électrodes dont six sont des grilles. Elle est utilisée comme mélangeuse et oscillatrice. En convertisseur, elle remplit les mêmes fonctions que l'heptode ; elle produit le signal oscillateur comme un générateur et sert simultanément d'étage mélangeur.

– Symbole



a = anode
g_6 = grille suppresseuse
g_5 = seconde grille écran
g_4 = grille de commande
g_3 = première grille écran
g_2 = anode oscillatrice
g_1 = grille oscillatrice
k = cathode
f = chauffage

Figure 330

– Construction

La construction de l'octode est semblable à celle de l'heptode. Cependant, une grille supplémentaire est placée entre la première grille de commande et la première grille écran. Cette grille sert d'anode auxiliaire et est utilisée pour produire le signal de l'oscillateur.
La figure 331 montre une octode.

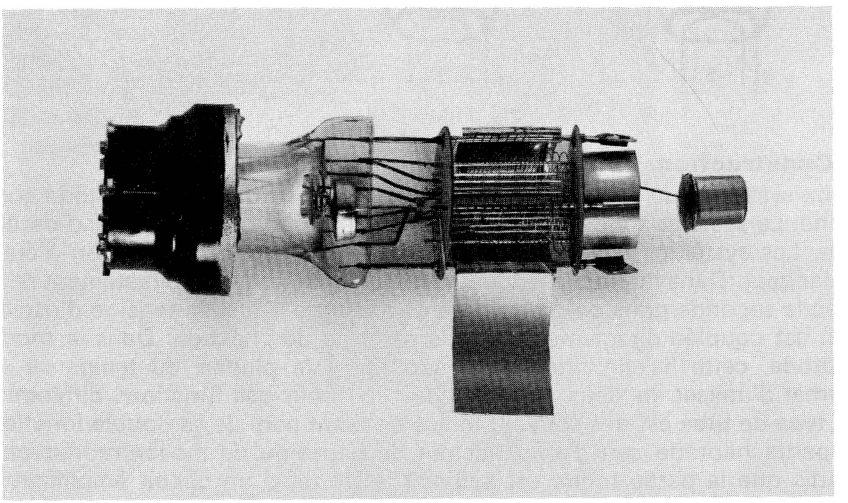


Figure 331

– Fonctionnement

La première et la seconde grille font office de triode. Elles servent à produire le signal oscillant. Les grilles trois à six, conjointement à l'anode, remplissent le rôle d'une heptode et sont utilisées pour opérer le mélange.

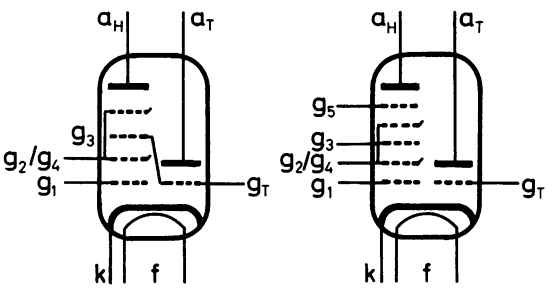
d. Tubes multiples

– Définition

Les tubes multiples sont un genre spécial de tubes mélangeurs. Une cathode commune alimente deux systèmes de tubes. Pour les étages mélangeurs, des *triodes-hexodes* et des *triodes-heptodes* sont construites. La tension d'oscillateur est produite dans la partie triode et les parties hexode ou heptode travaillent comme étage mélangeur.

– Symbole

La figure 332 montre les symboles d'une triode-hexode et d'une triode-heptode.



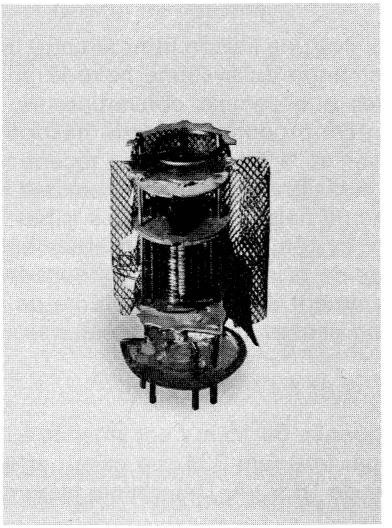
a_H = anode hexode/heptode
a_T = anode triode
g_T = grille triode

Figure 332

– Construction

Deux systèmes de tubes différents sont montés autour d'une cathode commune. Le système triode travaille en oscillateur, il produit le signal d'oscillation. Les systèmes hexode ou heptode se chargent de la fonction d'étage mélangeur. Dans la triode-hexode, la grille de la triode est directement reliée avec la seconde grille de commande de l'hexode. Ainsi, la tension d'oscillation est couplée directement avec le système de l'hexode. Dans la triode-heptode, cette liaison interne est supprimée la plupart du temps ce qui permet d'utiliser les deux systèmes du tube pour des fonctions différentes. Ce type de tube est très souvent utilisé en tirant parti de sa double fonction ; la partie heptode sert d'amplificateur de haute ou de moyenne fréquence tandis que la partie triode est souvent reliée dans un circuit amplificateur basse fréquence.

La figure 333 montre une triode-hexode et une triode-heptode.



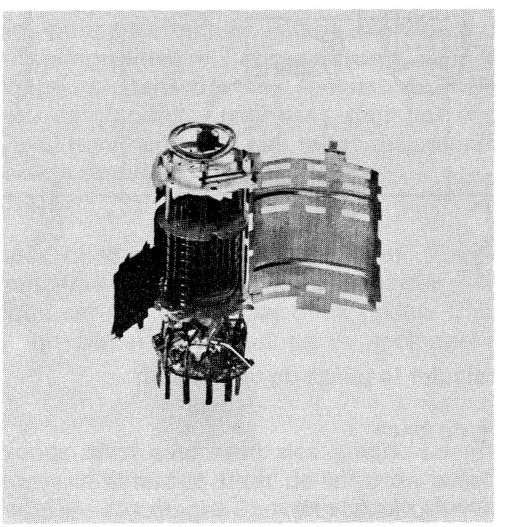


Figure 333

– Fonctionnement

Les tubes multiples qui ont une liaison interne entre la grille de la triode et la seconde grille de commande du système hexode ou de celui de l'heptode ne peuvent être utilisés que comme convertisseurs. Dans la partie triode, la tension d'oscillation est produite, la partie hexode ou celle de l'heptode fait office de mélangeur et la fréquence de réception arrive à la première grille de commande. Le signal de l'oscillateur est couplé directement à l'étage mélangeur par une liaison interne. Les tubes multiples, sans liaison interne entre les deux systèmes, sont utilisables séparément. Le système triode peut se charger de n'importe quelle fonction requise d'une triode tandis que, indépendamment de cela, le système de l'heptode peut remplir toutes les fonctions que permet ce type de tube.

5. Exemple

Une tension haute fréquence de 15 mV est amenée à l'étage mélangeur dont le schéma est donné par la figure 334. La valeur effective du courant de la moyenne fréquence est de 16,5 μA. Déterminer la pente et le gain de conversion.

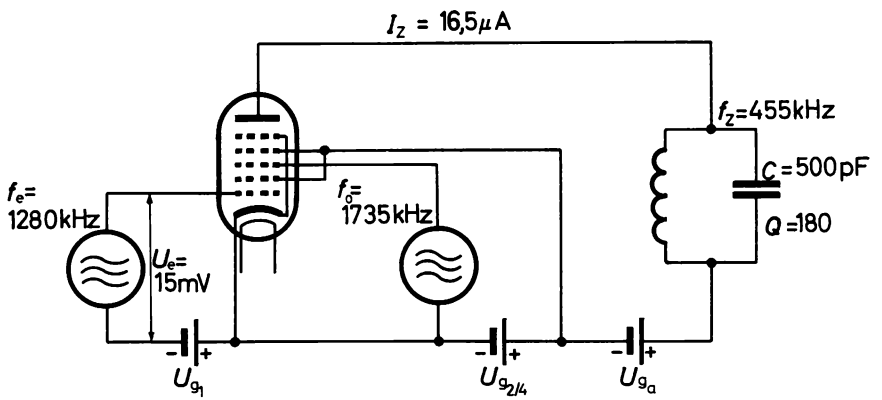


Figure 334

Marche à suivre:

Première étape : calculer la pente de conversion

– écrire la formule de base

$$S_c = \frac{I_z}{U_{g1}}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$S_c = \frac{16{,}5 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{A}{V}$$

$$S_c = \mathbf{1{,}1\ mA/V}$$

Deuxième étape : calculer le gain de conversion

- écrire la formule de base $V_c = \frac{U_z}{U_{g1}}$
- extraire U_z de la formule $U_z = I_z \cdot Z_o$ (Z_o = impédance du circuit à la résonance)
- écrire la formule qui donne Z_o $Z_o = Q \cdot X_c = \frac{Q}{\omega C}$
- introduire la formule de I_z et Z_o dans la formule de base qui donne V_c $V_c = \frac{I_2 \cdot Q}{\omega \cdot C \cdot U_{g1}}$; $[V_c] = \frac{A \cdot s \cdot V}{As \cdot V} = 1$
- introduire les valeurs et calculer $V_c = \frac{16{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 180}{2\pi \cdot 455 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 15 \cdot 10^{-3}}$

$V_c = \mathbf{138{,}5}$

6. L'essentiel

Les émetteurs et les récepteurs modernes travaillent avec des étages mélangeurs. Dans un étage mélangeur, deux fréquences sont mélangées ensemble. Le produit du mélange se compose d'un grand nombre de fréquences mais où la somme et la différence des deux fréquences d'entrée apparaissent avec une amplitude particulièrement forte. Dans les superhétérodynes, la fréquence à recevoir est mélangée avec celle produite dans le mélangeur lui-même. La différence des fréquences passe par un filtre de bande pour être amplifiée par la suite en tant que moyenne fréquence. Le mélange a lieu dans des tubes mélangeurs.

Afin que le mélange puisse s'effectuer, l'étage mélangeur doit présenter une courbe caractéristique non-linéaire. Par conséquent, tous les tubes conviennent comme mélangeurs. Dans des cas spéciaux le mélange est effectué dans des diodes ou des triodes. Cependant, dans les circuits standard on n'utilise, presque exclusivement, que des tubes mélangeurs. Nous connaissons les types suivants de tubes mélangeurs :

– L'hexode

Elle a six électrodes dont quatre sont des grilles. Deux de celles-ci font office de grille écran alors que les deux autres sont des grilles de commande. Le courant anodique est commandé par deux grilles. Chacune de celles-ci est alimentée par un signal. Les produits du mélange sont prélevés sur l'anode.

– L'heptode

Elle a sept électrodes dont cinq sont des grilles. La grille suppresseuse, montée dans ce tube, diminue le bruit de fond de celui-ci. Les heptodes permettent de construire des étages convertisseurs qui sont des mélangeurs utilisant le système de leurs électrodes pour produire le signal oscillant nécessaire au mélange.

– L'octode

Elle a huit électrodes dont six sont des grilles. Elle est presque toujours utilisée comme convertisseur.

– Les tubes multiples

Les tubes multiples, composés de deux systèmes, ont une cathode commune. Dans les étages mélangeurs on rencontre le plus souvent la combinaison triode-hexode ou triode-heptode. La triode est utilisée pour produire le signal oscillant, l'heptode ou l'hexode fait office d'étage mélangeur. Les triodes-heptodes peuvent aussi être utilisées pour des fonctions séparées lorsqu'il n'y a pas de liaison interne entre la triode et l'heptode.

La pente de conversion correspond au quotient de l'amplitude du courant moyenne fréquence par l'amplitude de la tension haute fréquence d'entrée. Le gain de conversion est égal au quotient de l'amplitude de la tension moyenne fréquence par l'amplitude de la tension haute fréquence d'entrée.

7. Exercices de répétition (solutions page 492)

a) Que signifie l'expression « mélange » lorsqu'elle se rapporte à un récepteur superhétérodyne ?
b) Quelles caractéristiques doit présenter un étage mélangeur afin que le mélange entre les deux signaux qui y arrivent puisse se produire ?
c) Un récepteur est accordé sur une fréquence d'entrée de 1400 kHz. L'oscillateur produit un signal dont la fréquence est de 1870 kHz. Quelle est la valeur de la moyenne fréquence du récepteur ?
d) Dans une hexode, quelle est la grille de commande qui détermine principalement le courant cathodique ?

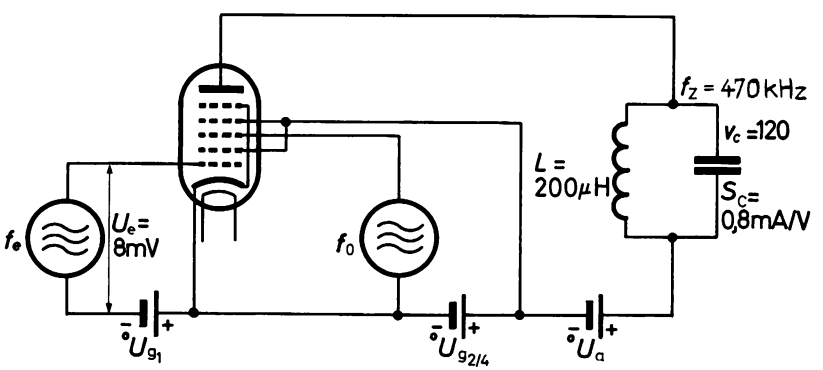


Figure 335

e) Quelle est la fonction de la seconde grille de commande de l'hexode ?
f) Où réside la différence entre une hexode et une heptode ?
g) Quels sont les principaux domaines d'utilisation de l'heptode ?
h) Qu'est-ce qu'un convertisseur ?
i) Pour quel genre de fonctionnement l'octode est-elle utilisée ?
k) Qu'est-ce qu'un tube multiple ?
l) Définissez la pente de conversion.
m) Donnez une définition du gain de conversion.
n) Calculez la qualité du circuit oscillant d'anode d'après le schéma de la figure 335.

VI. Tubes à atmosphère gazeuse

1. Introduction

Les tubes à atmosphère gazeuse – nommés communément : tubes à gaz – sont remplis d'un gaz sous basse pression après avoir été soumis à un vide poussé au cours de leur fabrication. Dans les tubes à gaz, par opposition aux tubes à vide, non seulement les électrons mais aussi les ions participent à la conduction du courant. C'est pour cette raison que les tubes à gaz sont souvent nommés : tubes ioniques. Il faut faire une distinction entre les tubes ioniques à cathode froide et ceux à cathode chaude. Le domaine d'application de ce genre de tube est très varié. Les tubes à lueur sont utilisés pour stabiliser une tension ou comme tubes de signalisation ; les tubes-relais permettent des fonctions de commutation et les thyratrons ou ignitrons sont utilisés pour la commande de moteurs ou de machines. Les redresseurs de puissance sont souvent équipés de tubes redresseurs à atmosphère gazeuse.

2. Que savez-vous au sujet des tubes à atmosphère gazeuse ? (solutions page 494)

a) Qu'est-ce qu'un ion ?
b) Vers quelle électrode les anions se déplacent-ils ?
c) Quelle électrode attire-t-elle les cations ?
d) Qu'entendez-vous par le terme « ionisation » ?
e) Expliquez la construction d'un tube à gaz.
f) L'allumage d'un thyratron peut-il être commandé depuis l'extérieur ?
g) Lorsque l'allumage d'un thyatron a eu lieu, à l'aide de l'électrode auxiliaire, peut-on le supprimer à nouveau ?

3. Les tubes à atmosphère gazeuse

a. Tubes à lueur

– Définition

Le *tube à lueur* est le plus simple *tube ionique*. Il comprend deux électrodes enfermées dans une ampoule de verre. L'ampoule est remplie avec un gaz dont la pression se situe entre 1/100 et 1/10 de la pression atmosphérique normale. La cathode du tube n'est pas chauffée.
Dans les anciens symboles, la présence du gaz était représentée par des hachures mais, dans les schémas modernes, elles représentent le tube dans son état conducteur. Dans les schémas modernes, la présence du gaz est représentée par un point.

– Symbole

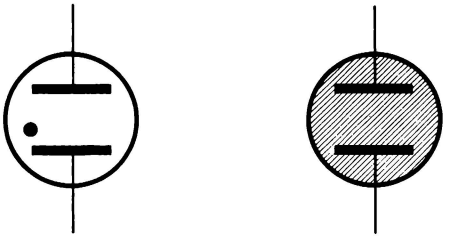


Figure 336

– Construction

Selon l'utilisation prévue, les deux électrodes du tube à lueur ont les formes les plus diverses. Dans le cas le plus simple, l'anode et la cathode sont des plaques de tôle. Le gaz de remplissage principalement utilisé est un gaz rare tel que le néon, l'argon et le xénon.
La figure 337 montre un tube à lueur.

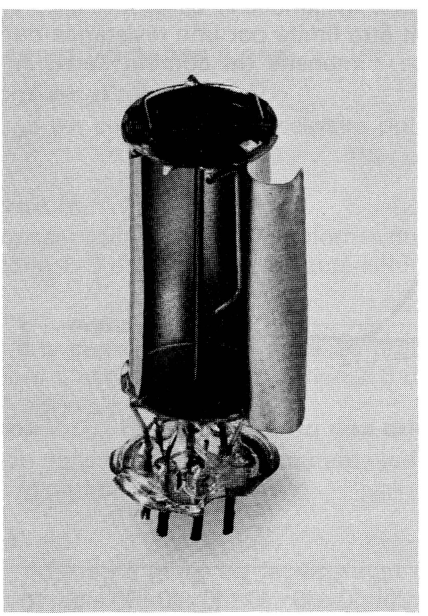


Figure 337

– Fonctionnement

Les molécules du gaz de remplissage sont continuellement en mouvement et par conséquent elles s'entrechoquent souvent. Au cours de ces chocs certaines molécules peuvent perdre un électron périphérique ou, au contraire, capter un électron libre. Ces molécules sont devenues des ions. Si une tension continue règne entre les électrodes, les ions positifs sont alors attirés par la cathode et l'anode attire les ions négatifs ainsi que les électrons. La vitesse de déplacement de ces porteurs de charges est d'autant plus grande que la tension appliquée est élevée. Malgré la faible pression du gaz dans le tube, le nombre des molécules gazeuses est encore très grand. Si la pression du gaz est de 1/100 de la pression atmosphérique normale, 300 mille milliards ($300 \cdot 10^{12}$) molécules gazeuses sont encore présentes dans un millimètre cube. Les chocs entre les porteurs de charges et les molécules sont, de ce fait, inévitables. Lorsque la vitesse des porteurs de charges est suffisamment grande, ceux-ci disposent d'une énergie cinétique qui leur permet d'arracher un électron à une molécule gazeuse. Cette dernière devient un ion positif et comme tel il est attiré par la cathode. L'électron libéré est accéléré en direction de l'anode par la tension positive de celle-ci. Ce processus se nomme *ionisation*. Pour une valeur déterminée de la tension appliquée il y a plus de porteurs de charges, libérés par l'ionisation que par la recombinaison et par ceux qui sont perdus. Le courant dans le tube augmente « comme une avalanche ». Le processus s'appelle *ionisation par choc*. Le courant doit être limité par une résistance dans le circuit d'anode. Sans cette résistance, l'intensité du courant serait si grande que le tube

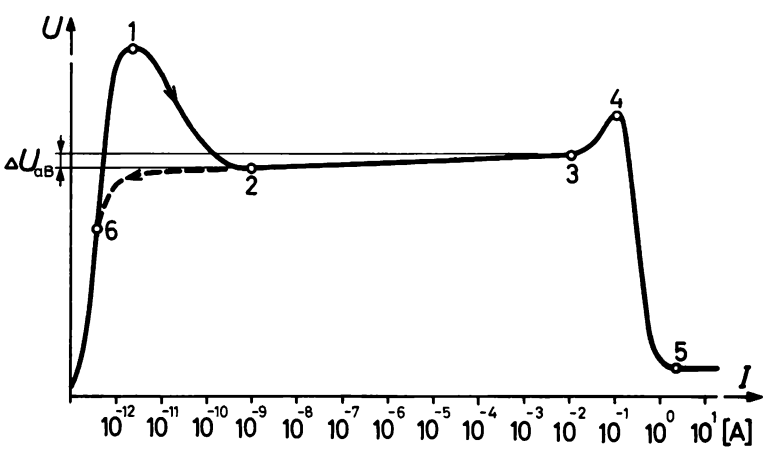


Figure 338

pourrait être détruit. L'ionisation par choc cause une luminescence dans le tube : l'allumage est réalisé. La valeur de la tension nécessaire pour allumer le tube est dépendante de la nature du gaz utilisé et de sa pression.
La figure 338 montre la relation qu'il y a entre la tension appliquée au tube et le courant anodique. *La tension d'amorçage* (1) est un peu plus haute que la *tension de fonctionnement* (2–3) car pour déclencher l'avalanche des électrons une plus grande vitesse leur est nécessaire. Cette vitesse est communiquée aux électrons par une tension anodique adéquate plus élevée. Aussitôt que le processus d'amorçage est réalisé l'ionisation peut être maintenue correctement par une tension un peu plus basse.
La tension, qui est ici nécessaire, s'appelle tension de fonctionnement ou mieux, *tension de décharge*. Elle se situe toujours quelque peu au-dessous de la tension d'amorçage. La tension pour laquelle l'ionisation cesse se nomme : *tension d'extinction* (6) ; elle est plus basse que la tension de décharge. Entre la zone 2–3 de la caractéristique, la tension aux bornes du tube est presque indépendante du courant. Cette zone de la caractéristique est utilisée pour la stabilisation de tension.
Si le courant dépasse le point 3 la tension de décharge augmente jusqu'à ce qu'au point 4 un arc se forme. Dès ce moment-là, la cathode est surchauffée par le courant qui passe et commence à émettre thermiquement. Alors la *tension tombe à la valeur de celle d'un arc* (5). A ce stade du fonctionnement le tube est détruit.

– Données concernant les tubes à gaz

Tension d'amorçage ou d'allumage U_z
La tension d'amorçage est celle qui est nécessaire pour que le tube puisse s'allumer.

Tension de décharge U_B
La *tension de décharge* est celle qui règne aux bornes du tube lorsque celui-ci fonctionne dans la zone 2-3 de sa courbe caractéristique.

Gamme des courants $I_{a\,min}$ **...** $I_{a\,max}$
La gamme des courants correspond à la zone de réglage du tube comme stabilisateur de tension. C'est celle de la distance 2-3 du diagramme.

Variation de tension ΔU_{aB} **dans la gamme des courants**
La variation de tension dans la gamme des courants indique de quelle valeur la tension varie dans la gamme des courants.

Résistance interne
La *résistance interne* du tube à lueur est la résistance en courant alternatif dans la gamme des courants. Elle est déterminée graphiquement, d'après la caractéristique $I_a - U_a$, en effectuant le rapport entre la variation de tension et la variation de courant. La figure 339 montre la marche à suivre.

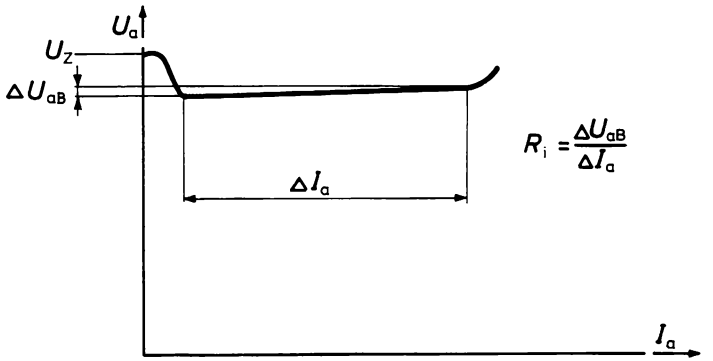


Figure 339

– Exemple

Le tube stabilisateur STV 108/30 doit être utilisé pour stabiliser la tension anodique d'un oscillateur. Le tube a les caractéristiques suivantes :

STV 108/30

– Tension de décharge U_B	106 . . . 111 V
– Tension d'amorçage	127 V
– Gamme des courants $I_{a\ max}$ . . . $I_{a\ min}$	30 . . . 5 mA
– Résistance interne R_i	100 ohms
– Variation de tension ΔU_{aB} dans la gamme des courants	3,5 V

Une tension anodique d'environ 110 V et un courant de 12 mA sont nécessaires pour l'oscillateur. Une source de tension anodique de 200 V est à disposition. Cette tension anodique peut varier de $\pm$ 20 V. Calculer la résistance série R_v d'après la figure 340. Après avoir choisi la résistance série R_v il faut rechercher dans quelle zone la tension U_a peut varier sans que le fonctionnement correct du stabilisateur n'en soit affecté.

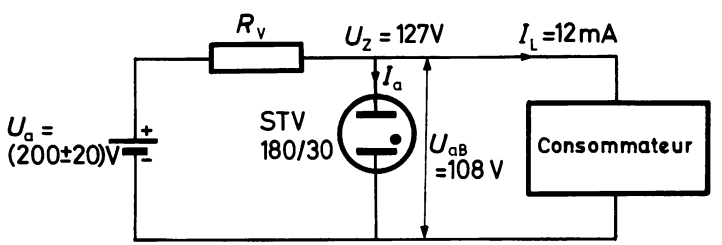


Figure 340

Marche à suivre:

Première étape: calculer la résistance série R_v

La résistance série doit absorber la différence de tension entre la tension anodique et la tension de décharge. Afin d'utiliser au mieux la zone de réglage nous choisissons le point de fonctionnement du stabilisateur au milieu de la gamme des courants. Selon la figure 341, un courant de 17,5 mA s'écoule dans le stabilisateur pour le point de fonctionnement choisi. La somme des courants I_a, (courant à travers le stabilisateur) et I_L (courant à travers la charge) s'écoule par la résistance série R_v.

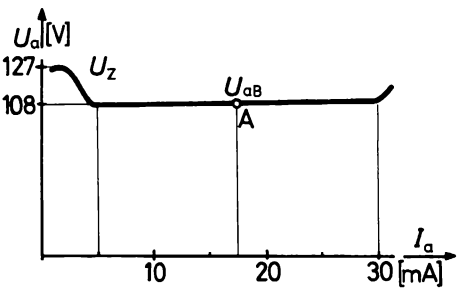


Figure 341

– écrire la formule donnant R_v $\quad R_v = \dfrac{U_a - U_{aB}}{I_a + I_L}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad R_v = \dfrac{200 - 108}{(17{,}5 + 12) \cdot 10^{-3}} \quad \dfrac{V}{A}$

$R_v = \mathbf{3{,}12\ k\Omega}$

Deuxième étape: contrôler si l'amorçage du tube est assuré (pour une tension anodique normale)

La résistance série R_v forme un diviseur de tension avec la résistance de charge. La tension à la résistance de charge doit être plus grande que la tension d'amorçage au moment de l'enclenchement.

– écrire la formule donnant R_L $\quad R_L = \dfrac{U_{aB}}{I_L}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad R_L = \dfrac{108}{12 \cdot 10^{-3}} \quad \dfrac{V}{A}$

$R_L = \mathbf{9\ k\Omega}$

– écrire la formule du diviseur de tension $\quad U_{ab_o} = \dfrac{U_a \cdot R_L}{R_v + R_L}$

– introduire les valeurs et calculer

$$U_{ab_o} = \frac{200 \cdot 9 \cdot 10^3}{(3{,}12 + 9) \cdot 10^3} \quad \frac{V \cdot V \cdot A}{A \cdot V}$$

$$U_{ab_o} = \mathbf{148{,}5\ V} > U_z$$

La tension d'amorçage nécessaire est de 127 V, ainsi celui-ci est assuré.

Troisième étape : vérification de la gamme de réglage
La gamme de réglage du stabilisateur est limitée par la gamme des courants. L'écart total admissible de la tension anodique est donné par le produit de la résistance série R_v par la gamme des courants.

– écrire la formule de base $\quad \Delta U_a = R_v \cdot I_a$

– introduire les valeurs $\quad \Delta U_a = 3{,}12 \cdot 10 \cdot (30 - 5) \cdot 10^{-3} \quad \frac{V}{A} A$

$$\Delta U_a = \mathbf{78\ V}$$

La gamme de réglage de $\pm$ 20 V, exigée ici, remplit également cette condition.

Quatrième étape : vérifier si l'amorçage est encore assuré pour la tension anodique minimale.

– écrire la formule du diviseur de tension

$$U_{ab_o\,min} = \frac{U_{a\,min} \cdot R_L}{R_v + R_L}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$U_{ab_o\,min} = \frac{180 \cdot 9 \cdot 10^3}{(3{,}12 + 9) \cdot 10^3}$$

$$U_{ab_o} = \mathbf{133{,}5\ V} > U_z$$

La tension d'amorçage nécessaire est de 127 V, l'amorçage est donc aussi assuré pour la limite inférieure de la gamme de réglage.

b. Le tube-relais

– Définition

Le *tube-relais* est un tube à cathode froide qui ne requiert aucun chauffage. Le système du tube comporte une cathode, une anode et une anode de déclenchement (starter ou trigger). Toutes les électrodes sont logées dans un tube de verre rempli de gaz rare.
Certains types comportent, en plus, une anode auxiliaire. Le tube-relais ne peut se trouver que dans deux états de fonctionnement : conducteur ou bloqué.

– Symbole

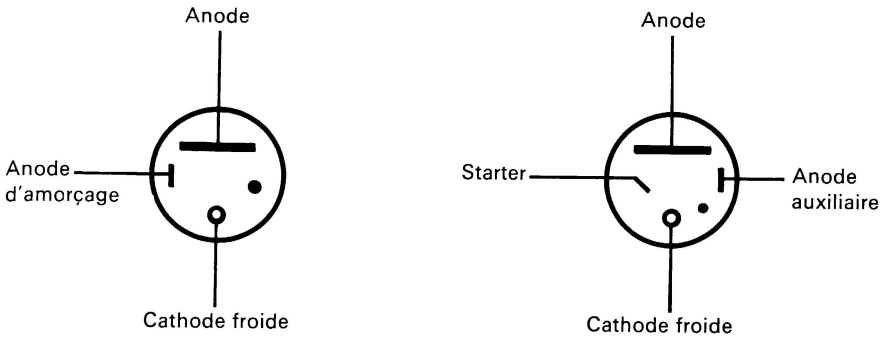


Figure 342

– Construction

La cathode se compose de baryum ou de molybdène spécialement préparé. Aux températures ambiantes normales, ces matériaux sont capables d'émettre des électrons. *L'anode d'amorçage, starter* ou *trigger*, est beaucoup plus proche de la cathode que l'anode ne l'est de celle-ci. Au moyen du starter il devient possible d'amorcer le tube avec une tension plus basse que sa tension normale d'amorçage. La figure 343 montre un tube-relais.

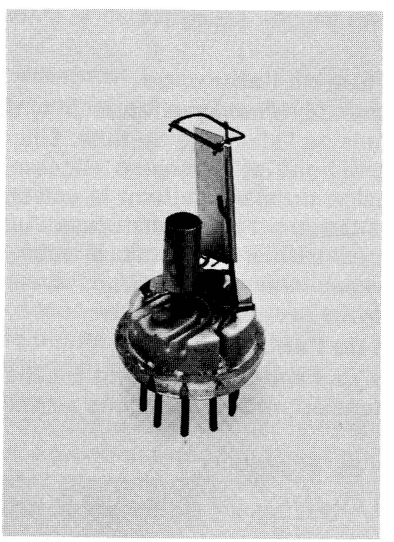


Figure 343

– Fonctionnement

Le phénomène de l'ionisation se déroule selon les mêmes lois que pour le tube à lueur. Cela signifie que le tube-relais, soumis à une tension anodique suffisamment élevée s'amorce – comme un tube à lueur ordinaire – même si aucune tension n'est appliquée sur l'électrode de déclenchement. Le starter qui est placé beaucoup plus près de la cathode que ne l'est l'anode, peut déclencher la décharge dans le tube avec une tension inférieure à la tension d'allumage du tube. La tension d'amorçage, au starter, déclenche le processus d'ionisation qui provoque ensuite la décharge principale entre la cathode et l'anode.

– Caractéristiques du tube

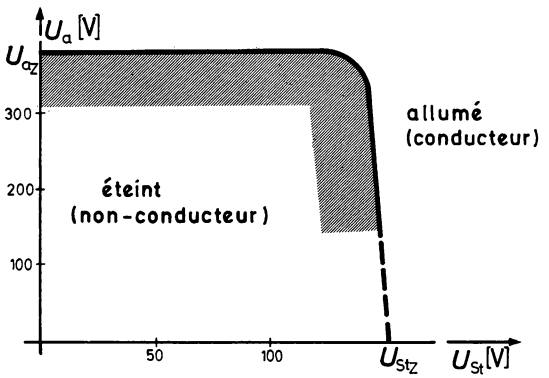


Figure 344

Courbe caractéristique de l'allumage

La *courbe caractéristique de l'allumage* (figure 344) donne des informations concernant les propriétés de l'allumage du tube. Elle montre la relation qu'il y a entre la tension anodique et la tension nécessaire pour déclencher le starter. Lorsque la tension du starter atteint la valeur U_{stZ}, le tube s'allume chaque fois même si la tension d'anode est basse. Au-dessous de la tension d'allumage du starter (de déclenchement), le tube ne s'allume que pour une tension anodique relativement élevée U_{aZ}.

Tension d'allumage de l'anode U_{aZ}

La *tension d'allumage de l'anode* correspond à celle pour laquelle le tube s'allume sans qu'une tension ne soit appliquée au starter.

Tension d'allumage du starter U_{stZ}

La *tension d'allumage du starter* est celle pour laquelle le processus d'allumage est déclenché.

Tension de décharge anodique U_{aB}
La *tension de décharge anodique* est celle qui s'établit entre la cathode et l'anode lorsque le tube est en fonctionnement.

Tension de décharge du starter U_{stB}
La *tension de décharge du starter* est celle qui existe sur cette électrode lorsque le tube est en fonctionnement.

Temps de désionisation t_d
Le *temps de désionisation* est celui qui, après l'extinction du tube, est nécessaire à la neutralisation de tous les porteurs de charges. Si une tension positive – plus grande que la tension de décharge – est appliquée à l'anode, avant que le temps de désionisation ne se soit écoulé alors le tube ne reste pas éteint, il se rallume tout de suite.

Courant anodique de pointe I_{asp}
Le *courant anodique de pointe* est celui, maximal et admissible, que peut supporter le tube pendant un court instant.

Courant anodique maximal I_{amax}
Le *courant anodique maximal* est le plus élevé, admissible, que peut supporter le tube en fonctionnement continu.

Courant anodique minimal I_{amin}
Le *courant anodique minimal* correspond au plus petit courant anodique pour lequel le maintien de la décharge est encore assuré.

Courant de starter maximal I_{stsp}
Le *courant de starter* maximal est le plus élevé, admissible, entre le starter et la cathode.

Temps d'intégration τ_{max}
Le *temps d'intégration* joue un rôle lorsque le tube travaille en régime d'impulsions. Il indique le temps le plus long pendant lequel le courant anodique maximal peut être dépassé. Un exemple va élucider cette affirmation :
Le tube-relais 5823 possède les caractéristiques suivantes :
– courant anodique de pointe I_{asp} 100 mA
– courant anodique maximal I_{amax} 25 mA
– temps d'intégration τ_{max} 5 s
Le produit du courant anodique maximal par le temps d'intégration donne : 25 mA · 5 s = 125 mAs. Le courant anodique de pointe, en régime d'impulsions, ne doit également pas être dépassé. Par conséquent on peut, par exemple, charger le tube pendant 1,25 s avec 100 mA ou pendant 2 s avec 62,5 mA.

Le produit $I_a \cdot t$ ne doit jamais être plus grand que $I_{amax} \cdot \tau_{max}$, et là, I_a ne doit jamais dépasser la valeur de I_{asp}.

– Exemple

Le tube-relais 5823 A possède les caractéristiques suivantes :

U_{aZ}	350 V	τ_{max}	5 s
U_{stZ}	70 . . . 90 V	I_{asp}	100 mA
U_{aB}	65 V	I_{amax}	25 mA
U_{stB}	60 V	I_{amin}	5 mA
t_d	1 ms	I_{stsp}	0,5 mA

La figure 345 montre le schéma de la commande électronique d'une machine à souder par points pour laquelle le tube-relais 5823 A est utilisé. Le soudage doit être déclenché, chaque fois, par une impulsion de commande de longueur quelconque (pression sur une touche de contact) et interrompu automatiquement après 50 ms.

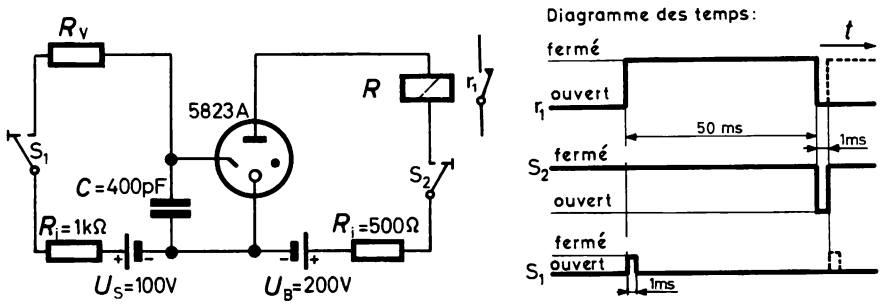


Figure 345

Au moyen d'un formateur d'impulsions et d'un circuit de retardement (non représentés sur la figure 345), le contact S_1 se ferme pendant 1 ms par pression sur le bouton-poussoir et déclenche ainsi l'allumage du tube-relais. Le contact S_2, qui est fermé en position d'attente, s'ouvre 50 ms après le début du soudage par l'action du circuit de retardement. Il interrompt ainsi le courant anodique dans le tube-relais et par conséquent le soudage. Le contact de relais r_1 commande le courant dans le circuit primaire du transformateur de soudure.

Calculer les valeurs suivantes, nécessaires pour la commande du tube-relais :

- la résistance ohmique minimale du relais R
- la résistance additionnelle R_v limitant le courant de commande au 25% de sa valeur de pointe
- le temps Δt qui doit s'écouler avant que S_2 ne puisse se fermer à nouveau. Dans le cas extrême, la fermeture de S_2 peut coïncider avec l'impulsion suivante
- la constante de temps du circuit R_v–C.

Marche à suivre:

Première étape : calculer la résistance ohmique minimale de la bobine du relais

Condition: la résistance minimale de la bobine doit être de valeur telle que la chute de tension dans le relais, pour le courant anodique maximal admissible, s'accorde avec la différence entre la tension de décharge et la tension à vide de la batterie.

- exprimer cette condition en une formule

$$(I_{a_{max}} \cdot R_r) = U_B - (U_{aB} + I_{a_{max}} \cdot R_i)$$

- extraire R_r de la formule

$$R_r = \frac{U_B - (U_{aB} + I_{a_{max}} \cdot R_i)}{I_{a_{max}}}$$

- introduire les valeurs et calculer

$$R_r = \frac{200 - 65 - (25 \cdot 10^{-3} \cdot 500)}{25 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_r = \mathbf{4{,}9\ k\Omega}$$

Deuxième étape : calculer la résistance additionnelle R_v

Condition: un quart du courant de pointe de la commande doit provoquer une chute de tension dans R_v qui doit s'accorder avec la différence entre la tension de la batterie et la tension de décharge du starter.

- exprimer cette condition en une formule

$$(R_v \cdot I_{st_{sp}} \cdot 0{,}25) = U_s - (U_{st_B} + R_{i_s} \cdot I_{st_{sp}} \cdot 0{,}25)$$

- extraire R_v de la formule

$$R_v = \frac{U_s - (U_{st_{sp}} + R_{i_s} \cdot I_{st_{sp}} \cdot 0{,}25)}{I_{st_{sp}} \cdot 0{,}25}$$

- introduire les valeurs et calculer

$$R_v = \frac{100 - (60 + 1 \cdot 10^3 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}25)}{0{,}5\ 10^{-3} \cdot 0{,}25}$$

$$R_v = \mathbf{319\ k\Omega}$$

Troisième étape : déterminer Δt

t correspond au temps de désionisation t_d.

$$\Delta t = t_d = \mathbf{1\ ms}$$

Si S_2 se fermait de nouveau avant l'écoulement du temps t_d, le tube se rallumerait sans qu'une tension d'amorçage ne soit présente au starter.

Quatrième étape : calculer la constante de temps de $R_v - C$

- écrire la formule de base

$$\tau = R_v \cdot C \frac{VAs}{AV}$$

- introduire les valeurs et calculer

$$\tau = 319 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-10}$$

$$\tau = \mathbf{0{,}128\ ms}$$

c. Le thyratron

– Définition

Le *thyratron* est un tube à trois électrodes, rempli de gaz rare. Le système des électrodes comprend une cathode chauffée, une grille de commande et une anode. Le thyratron, comme le tube-relais, ne possède que deux états de commutation : conducteur ou bloqué.

– Symbole

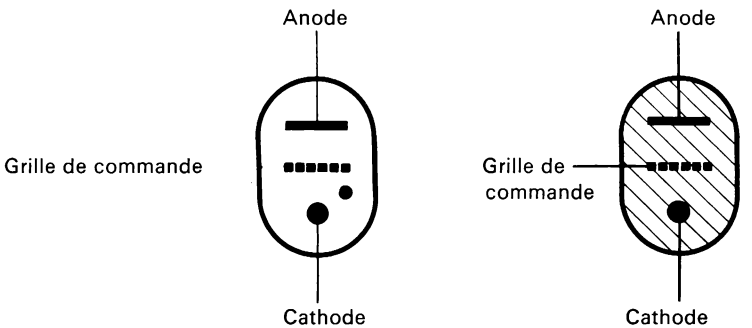


Figure 346

– Construction

La cathode possède une très grande surface car de forts courants s'écoulent dans les thyratrons. La plupart de ces tubes ont un chauffage indirect. Le plus souvent, la grille se présente comme un diaphragme percé. L'anode est constitutée par un disque.

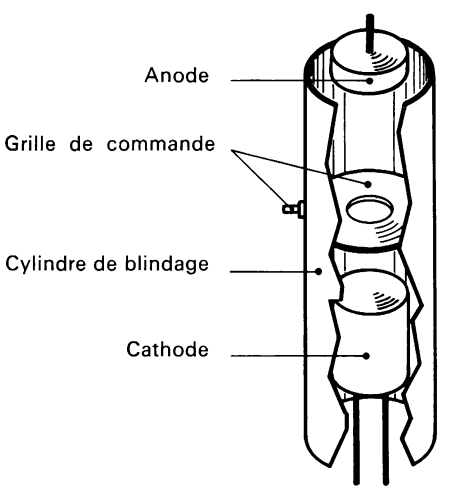


Figure 347

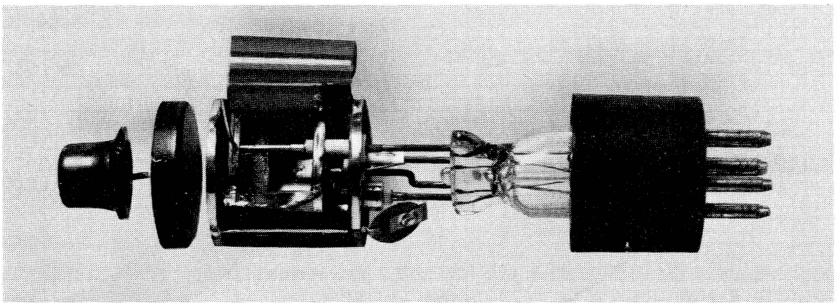


Figure 348

L'anode est souvent reliée directement à un contact situé sur le haut de l'ampoule de manière à pouvoir y amener en toute sécurité de hautes tensions de bloquage. Le remplissage gazeux est soit un gaz rare soit de la vapeur de mercure. La figure 347 indique schématiquement la construction d'un thyratron et la figure 348 montre sa construction.

– Fonctionnement

La courbe caractéristique du thyratron sera relevée selon le schéma de la figure 349.

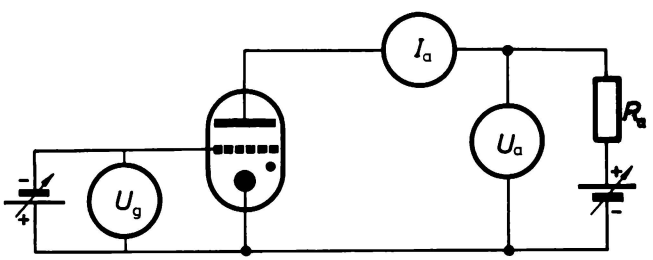


Figure 349

Pour un thyratron il est intéressant de connaître le rapport entre la tension d'anode et la tension de grille pour lequel le tube s'allume. Pour relever cette *courbe caractéristique de commande*, la tension anodique est variée jusqu'à ce que le tube s'allume, pour plusieurs valeurs de la polarisation de grille. Les résultats des mesures sont reportés sur un diagramme $U_a - U_g$. Les valeurs mesurées présentent de grandes divergences entre les divers tubes du même type. Les tolérances sont plus grandes que pour les tubes à vide.

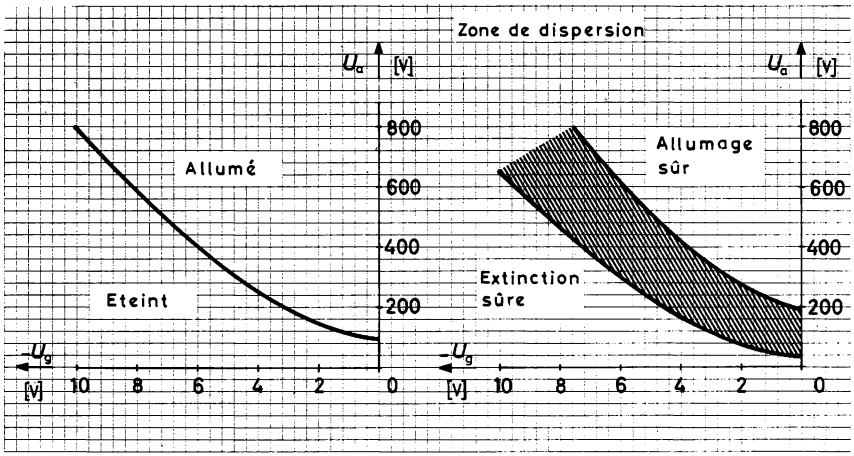


Figure 350

De plus, le processus d'allumage est fortement influencé par la température du tube.

La figure 350, à gauche, montre la courbe caractéristique de commande d'un tube. A droite, nous voyons la caractéristique pour le même type de tube qui tient compte des données concernant la zone de dispersion. La surface hachurée représente la zone de dispersion : à sa gauche, le tube est certainement bloqué (extinction sûre) et à sa droite, il est certainement conducteur (allumage sûr). Le processus d'ionisation est le même que pour les autres tubes à gaz. La tension anodique est appliquée au tube à travers la résistance R_a qui fait office de limiteur de courant. Sans cette résistance de limitation, le courant anodique atteindrait des valeurs si grandes que le tube en serait détruit. Le potentiel négatif, sur la grille, freine fortement les électrons émis par la cathode et leur vitesse n'est ainsi plus suffisante pour déclencher une ionisation de choc. Maintenant, si la tension d'anode est augmentée ou bien la polarisation de grille diminuée, l'ionisation du gaz se produit brusquement dans le tube : il s'est allumé. Pratiquement, le courant anodique n'est limité que par la résistance de limitation et la résistance interne de la source de tension. La tension à l'anode s'abaisse à la *tension d'arc* U_{arc}.

Dans le tube à l'état conducteur, la concentration des ions gazeux est si forte que l'effet de la tension négative de grille est neutralisé. Le tube ne peut être éteint que lorsque la tension est abaissée au-dessous de la tension d'arc.

– Données techniques

Courbe caractéristique de commande

La *courbe caractéristique de commande* indique le rapport entre la tension d'anode et de grille pour lequel le tube s'allume.

Tension de bloquage $U_{a_{sperr}}$
La *tension de bloquage* est négative, c'est celle qui peut apparaître sur l'anode, lorsque le tube est utilisé comme redresseur.

Tension d'arc U_{arc}
La *tension d'arc* est celle qui règne entre l'anode et la cathode du thyratron quand il est conducteur.

Courant anodique $I_{a_{max}}$
Le *courant anodique maximal* est celui qui est admissible en service permanent.

Courant anodique de pointe $I_{a_{sp}}$
Le *courant anodique de pointe* correspond à sa valeur admissible instantanée la plus élevée.

Temps de désionisation t_d
Le *temps de désionisation* a la même signification que pour les tubes-relais.

Temps de ionisation t_i
Le *temps d'ionisation* est celui qui s'écoule entre l'instant où la tension est appliquée sur l'anode et celui où le tube est effectivement allumé. Sa valeur est de l'ordre de la μs.

Temps d'intégration τ_{max}
Le *temps d'intégration* a la même signification que pour les tubes-relais.

– Exemple
La luminosité de la lampe de projection d'un appareil d'agrandissement doit être réglée de façon continue par un petit thyratron. La figure 351 en montre le schéma et la courbe caractéristique de commande.

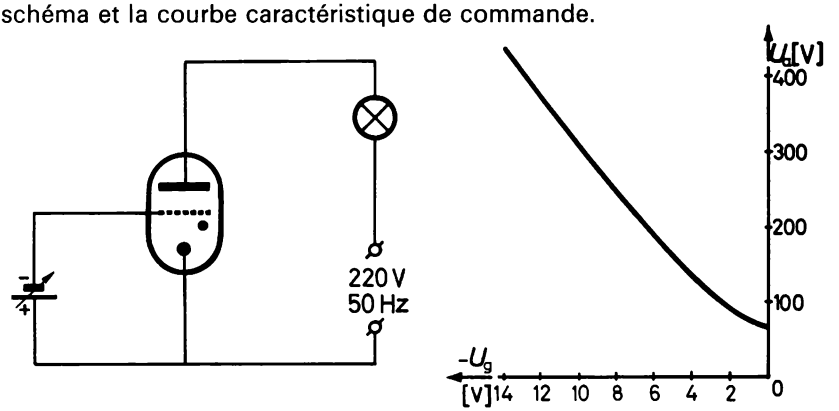


Figure 351

On demande de déterminer graphiquement, d'après la courbe caractéristique de commande, la forme du courant qui s'écoule à travers la lampe pour la luminosité maximale et minimale. Calculer les valeurs de polarisation de grille nécessaires.

Marche à suivre (figure 352) :

- construction graphique de la demi-onde positive de la tension anodique pour 220 V ;
- déterminer l'angle d'allumage φ_1 pour $U_g = 0$ V ;
- déterminer l'angle d'allumage φ_2 et la polarisation de grille qui lui correspond pour la valeur de crête positive de la demi-onde de la tension anodique ;
- délimiter la surface des deux angles d'allumage ;
- la forme de la courbe des deux surfaces ainsi délimitées correspond à la forme des impulsions de courant à travers l'utilisateur ohmique ;
- la polarisation de grille donnant la luminosité la plus faible, lue sur le diagramme, est de −10 V ;

En pratique, toute la gamme de réglage n'est pas entièrement utilisable car un allumage à la polarisation maximale de grille pour la tension anodique positive de crête ne peut pas être garanti dans tous les cas du fait que la courbe caractéristique est dépendante de la température.

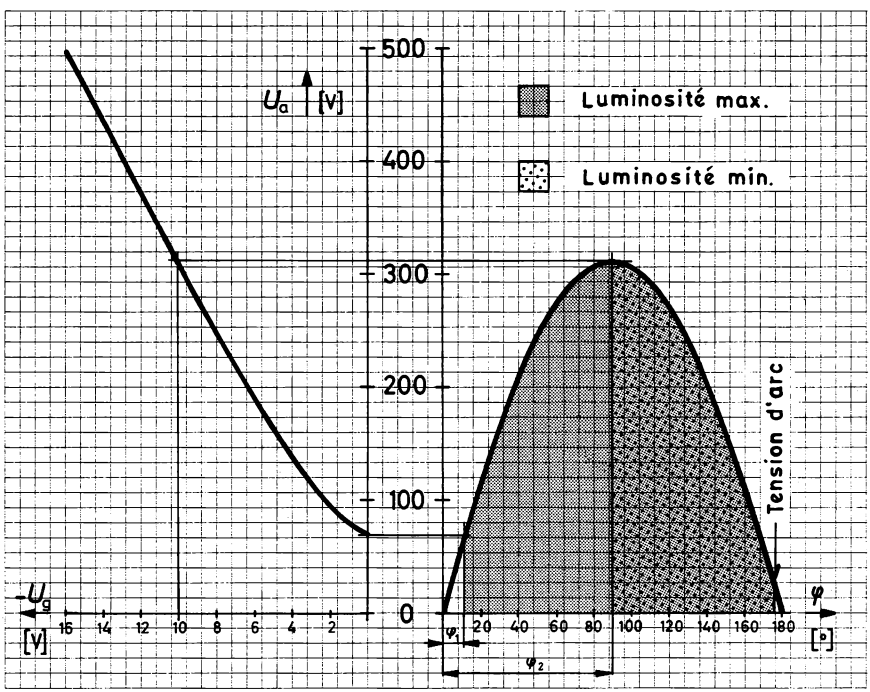


Figure 352

C'est pourquoi on choisit une polarisation de grille un peu plus faible pour laquelle l'angle d'allumage est légèrement diminué.
Le désavantage de ce circuit réside dans la mauvaise utilisation de la gamme de réglage. Le tube doit s'allumer au cours de la première moitié de l'amplitude de tension, l'angle d'allumage est par conséquent toujours plus petit que 90°. Si l'angle d'allumage doit être plus grand que 90° alors la grille du thyratron doit être commandée par une tension alternative à phase variable. Ce genre de commande est souvent utilisé dans la pratique.

d. L'ignitron

– Définition

L'*ignitron* est un tube à gaz, possédant trois électrodes dont le système comprend une cathode non chauffée, une pointe d'allumage et une anode. L'ignitron peut commuter de hautes tensions et de grandes intensités. L'évacuation de la chaleur est assurée par une double paroi métallique refroidie à l'eau. L'ignitron, comme le thyratron, ne possède que deux états : conducteur ou bloqué.

– Symbole

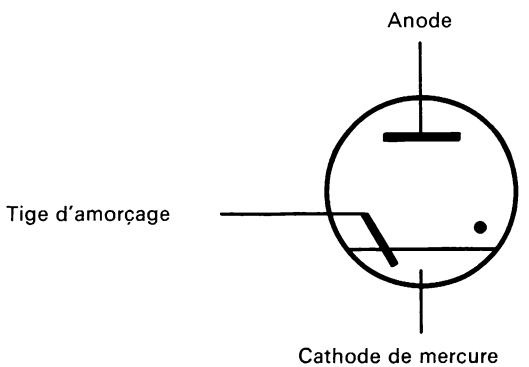


Figure 353

– Construction

La cathode est du mercure. La pointe d'allumage est faite d'un matériau semi-conducteur ayant une très bonne stabilité thermique. Elle plonge constamment dans le bain de mercure de la cathode. L'anode, en graphite, a des dimensions suffisantes pour écouler des courants très intenses. Tout le système des électrodes est contenu dans un cylindre métallique à double paroi. La figure 354 montre, de façon schématique, la construction d'un ignitron.

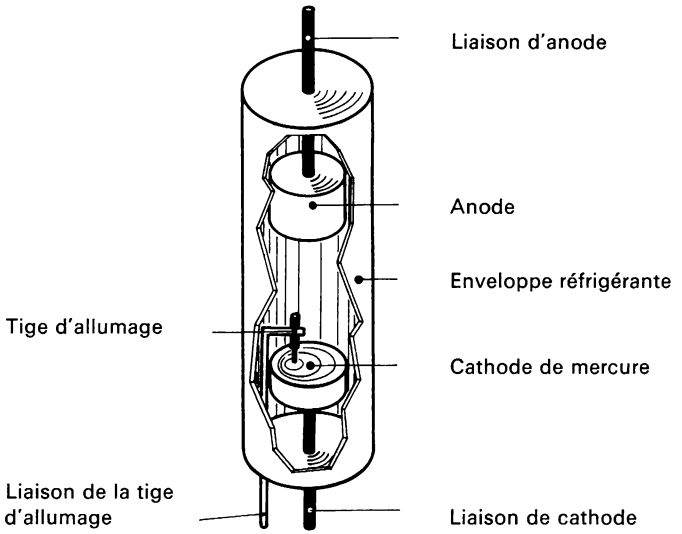


Figure 354

– Fonctionnement

L'ignitron est allumé par une brève application de tension sur l'électrode d'amorçage. Le courant, qui traverse cette électrode, est relativement intense (env. 40 A) ce qui a pour effet de former un petit arc électrique entre cette électrode et le mercure. Ce procédé provoque la vaporisation du mercure et sa ionisation. La décharge s'établit instantanément dans l'espace entre la cathode et l'anode, pour autant qu'une tension positive y soit présente. Les ions positifs du mercure vaporisé frappent la cathode avec une grande vitesse et y produisent une tache dont la température est très élevée. Cette tache s'éteint dès que la tension anodique tombe au-dessous de la tension d'arc qui est d'environ 16 V. La cathode de mercure peut émettre des courants anodiques dont la valeur moyenne est de 50 à 200 A. La tension d'allumage nécessaire se situe autour de 150 V. Les courants anodiques, malgré leur faible tension d'arc, produisent une puissance calorifique importante qui doit être évacuée par un système de refroidissement. Le plus souvent, le refroidissement est assuré par de l'eau. Les ignitrons sont utilisés comme redresseurs commandés pour des courants intenses et pour la commande des machines à souder.

– Données techniques

En exceptant la tension et le courant d'allumage, les mêmes définitions concernant les données techniques mentionnées pour les thyratrons s'appliquent aussi aux ignitrons.

Données caractéristiques d'un ignitron

Tension d'arc U_{arc}	13 V
Tension de désionisation t_d	1 ms
Tension anodique maximale $U_{a_{max}}$	500 V
Tension de blocage $U_{a_{sperr}}$	500 V
Tension à l'électrode d'allumage	200 V
Courant anodique de pointe $I_{a_{sp}}$	700 A
Courant anodique moyen I_a	40 A
Limites de température	10 . . . 40° C

Les limites de température doivent être maintenues sinon un fonctionnement impeccable de l'ignitron n'est plus garanti.

– Exemple

La figure 355 montre le principe d'un appareil électronique de soudure pour courants intenses. L'ignitron fonctionne comme un interrupteur. Dès que l'interrupteur S est fermé, une tension positive apparaît sur la cathode de la diode D pendant chaque demi-onde positive. Lorsque cette tension atteint la valeur minimale nécessaire, elle allume le tube. Aussitôt que la tension anodique tombe au-dessous de la valeur de la tension d'arc, l'ignitron s'éteint. Le processus d'allumage se répète pendant chaque demi-onde positive de la tension alternative d'anode tant que l'interrupteur S reste fermé. Dans le bobinage primaire du transformateur de soudure un courant continu pulsé s'écoule.

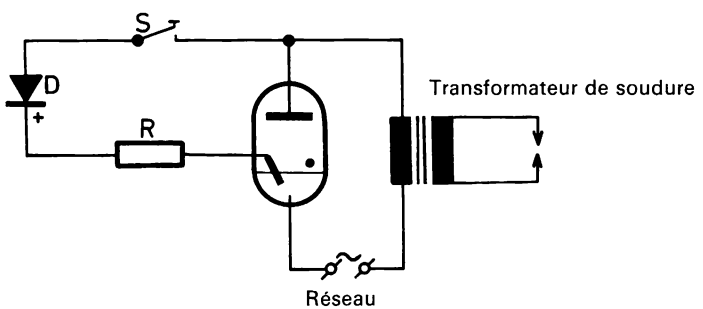


Figure 355

L'ignitron est bien plus durable qu'un interrupteur mécanique dont les contacts ne tarderaient pas à présenter une usure rapide pour des courants si intenses.

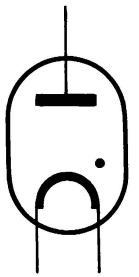
Dans la pratique, deux ignitrons sont montés dans un circuit antiparallèle afin d'utiliser la seconde demi-onde de la tension alternative d'anode.

e. Tubes redresseurs à gaz

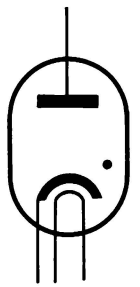
– Définition

Les *diodes à gaz* sont des tubes redresseurs dont la cathode est chauffée. Le gaz de remplissage est de la vapeur de mercure ou un gaz rare.

– Symbole



Diode à gaz, chauffage direct



Diode à gaz, chauffage indirect

Figure 356

– Construction

La plupart des diodes à gaz ont une cathode à chauffage direct. Celle-ci se compose d'un filament spiralé recouvert d'une couche émissive. La cathode est soumise à un bombardement intense par les ions. Tous les ions positifs gazeux sont attirés par la cathode négative. Ces ions frapperaient la cathode avec une grande vitesse et l'énergie ainsi libérée pourrait causer la destruction de sa couche émissive. C'est pour cette raison que la cathode est munie d'un blindage qui retient les ions. Les électrons émis contournent ce blindage. La figure 357 permet d'observer la construction d'une diode à gaz.

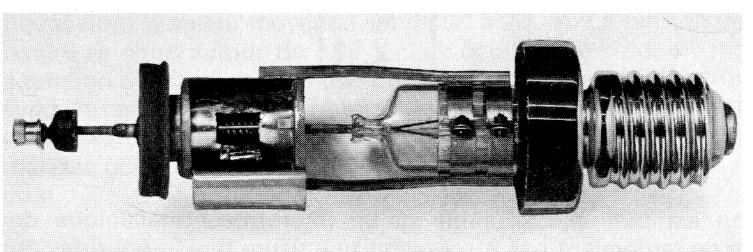
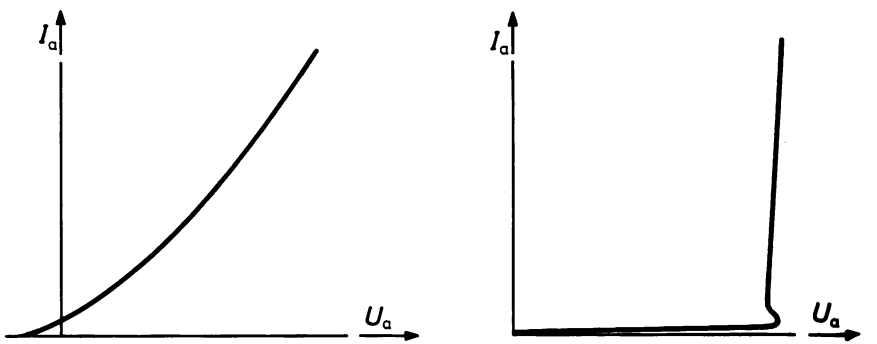


Figure 357

– Fonctionnement

La cathode est chauffée, elle émet des électrons. Si la tension appliquée dépasse celle de l'allumage, l'ionisation de choc s'établit. Aussi longtemps que la tension anodique reste au-dessous de la tension d'allumage, un très faible courant électronique, sans importance, s'écoule dans le tube car les électrons émis entrent continuellement en collision avec les molécules du gaz, ce qui a pour effet de les freiner énergiquement. Ce n'est que lorsque la tension d'allumage est atteinte que la vitesse des électrons est suffisante pour amorcer l'ionisation du gaz. Les ions positifs, attirés par la cathode, empêchent la formation d'une charge d'espace et c'est pour cette raison que le courant anodique d'un tube à gaz croît brusquement dès que la tension d'allumage est atteinte ; par opposition à ce qui se passe dans les diodes à vide.

La figure 358 montre la différence entre la courbe caractéristique d'une diode à gaz et celle d'une diode à vide.



Diode à vide Diode à gaz

Figure 358

Puisque, à part les électrons, les ions participent aussi à la conduction du courant, il en résulte une très faible résistance interne qui rend nécessaire une limitation du courant. Par conséquent, dans le circuit anodique d'une diode à gaz, une résistance ohmique ou inductive doit toujours y être insérée. La tension, aux bornes d'un tube à vapeur de mercure, tombe à la tension d'arc qui est d'environ 15 V.

Le comportement en fonctionnement des tubes à vapeur de mercure est très fortement influencé par la pression de la vapeur qui règne à l'intérieur de ceux-ci. La température du tube influence également la pression du gaz. Les tubes de grande puissance doivent de ce fait être réchauffés. Cette condition est remplie lorsque la tension de chauffage est enclenchée avant la tension anodique. Ce réchauffage dure quelques minutes. La tension anodique est souvent enclenchée par un relais à retardement.

– Exemple

Une diode à gaz est utilisée comme tube redresseur pour charger des accumulateurs. La figure 359 montre le schéma de principe.

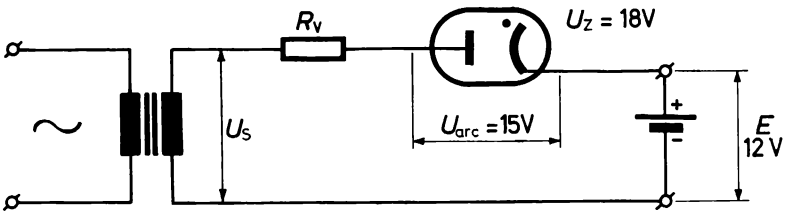


Figure 359

L'installation est projetée pour 12 V. La tension d'allumage du tube est de 18 V, la tension de décharge est de 15 V. Le transformateur doit être calculé pour que le tube s'allume sûrement. Calculer la tension au secondaire du transformateur. Vérifier pendant quelle durée de la courbe de tension positive le tube débite du courant et quelle sera la valeur de la tension de blocage aux bornes du tube.

Marche à suivre:

Première étape : calculer la tension secondaire nécessaire

– Condition : la tension de pointe au secondaire doit être plus grande que la somme de la tension d'allumage du tube et de la F.E.M. de la batterie
– exprimer cette condition en une formule $U_{s_s} > U_z + E$

Pour que l'allumage soit sûr, nous choisissons un coefficient de sécurité de 1,2. Ce dernier est introduit dans la formule :

$$U_{s_s} = 1{,}2\ (U_z + E)$$

– disposer la formule en valeur efficace de U

$$U_s = \frac{1{,}2\ (U_z + E)}{\sqrt{2}}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$U_s = \frac{1{,}2\ (18 + 12)}{\sqrt{2}}$$

$$U_s = \mathbf{25{,}46\ V}$$

Deuxième étape : calculer la durée d'écoulement du courant
– L'estimation s'effectue graphiquement selon la figure 360 :

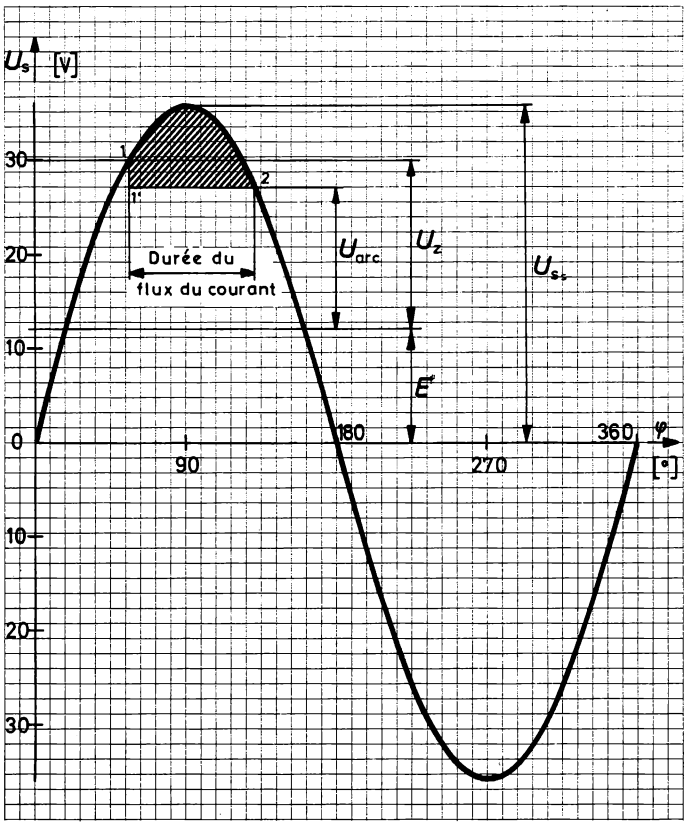


Figure 360

– dessiner la tension au secondaire du transformateur
– reporter la F.E.M. *E* de la batterie
– additionner la tension d'allumage avec la F.E.M., sur le diagramme
– additionner la tension de décharge avec la F.E.M., sur le diagramme
– construire la surface qui correspond au flux du courant.
A l'instant de l'allumage (point 1), la tension aux bornes du tube tombe à la valeur de la tension de décharge (point 1'). Si la tension appliquée tombe au-dessous de la valeur de la tension de décharge, le tube s'éteint (point 2). Puisque, pendant la demi-onde positive, la F.E.M. de la batterie va à l'encontre de la tension du transformateur les tensions d'allumage et de décharge sont déplacées vers le haut – sur le graphique – de la valeur de la F.E.M.

Le dessin montre que le courant ne s'écoule que pendant un bref instant. La surface hachurée est petite par rapport à la demi-onde positive, cela signifie que l'écoulement du courant est faible. Si l'on veut augmenter le courant de charge on doit alors élever la tension secondaire du transformateur.

Troisième étape : calculer la tension de blocage

- condition : pendant la demi-onde négative, la tension de blocage apparaît aux bornes du tube. Celle-ci se compose de l'addition de la F.E.M. de la batterie et de la tension de pointe de la demi-onde négative.
- exprimer cette condition en une formule $U_{sperr} = U_{s_s} + E$
- introduire les valeurs et calculer $U_{sperr} = 25{,}5 \cdot \sqrt{2} + 12$

$U_{sperr} = \mathbf{48\ V}$

La figure 361 montre comment se forme la tension de blocage.

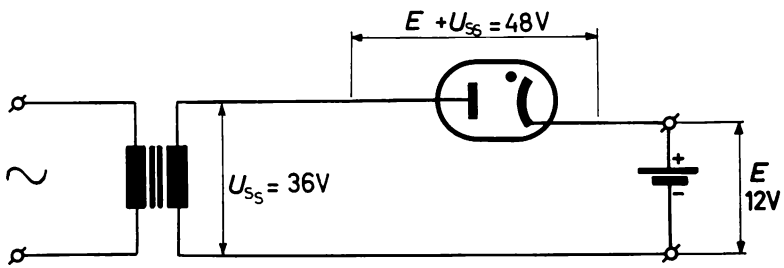


Figure 361

4. L'essentiel

Le *tube à lueur* est le plus simple des tubes ioniques, il se compose de deux électrodes placées l'une en face de l'autre dans une ampoule de verre remplie d'un gaz rare. La tension d'allumage déclenche l'ionisation de choc et le tube devient conducteur. La tension de décharge s'établit aux bornes du tube lorsque celui-ci est allumé, cette tension est très stable et pratiquement indépendante du courant qui traverse le tube. Par conséquent, ce tube est utilisé pour la stabilisation de tension. La résistance en courant alternatif du tube est très faible. Les tubes à lueur fonctionnent tant en courant continu qu'en courant alternatif. Ils ne peuvent fonctionner que s'ils sont munis d'une résistance série qui limite leur courant.

Le *tube-relais* ne nécessite aucun chauffage, il fonctionne avec une cathode froide. Son système d'électrodes composé de la cathode, de l'anode et de l'anode-starter est logé dans une ampoule de verre remplie d'un gaz rare. L'allumage du tube est amorcé (déclenché) par le starter. L'extinction ne peut se faire qu'en interrompant le circuit d'anode.

Entre l'extinction du tube et l'allumage suivant, un laps de temps au moins égal à celui nécessaire à la désionisation, doit être inséré. Les tubes-relais ne nécessitent aucun entretien, c'est pour cette raison qu'ils sont particulièrement utilisés dans les installations de surveillance.
Le *thyratron* est un tube à gaz comprenant une cathode chauffée, une grille de commande et une anode. L'allumage du tube est amorcé par la grille de commande. Pour que l'extinction puisse se produire il faut que la tension anodique tombe au-dessous de la tension d'arc. Le rapport entre la tension d'anode et celle de grille, nécessaire pour provoquer l'allumage, est représenté graphiquement par la courbe caractéristique de commande. Les thyratrons sont utilisés en tant que redresseurs commandés pour le réglage du nombre de tours des moteurs à courant continu, etc.
L'*ignitron* est prévu pour conduire des courants très élevés. Son système d'électrodes comprend une cathode de mercure, une tige d'allumage et une anode. L'allumage ne peut se produire que si une petite quantité de mercure est vaporisée. A cet effet, une impulsion de tension est appliquée à la tige d'allumage et le courant instantané, très élevé, amorce l'ionisation. L'extinction de l'ignitron ne peut avoir lieu que lorsque la tension anodique tombe au-dessous de la tension d'arc. Les ignitrons sont utilisés chaque fois que des courants très intenses doivent être commutés.
La *diode à gaz* est un tube redresseur à vapeur de mercure équipée d'une cathode chauffée. Lorsque la tension d'allumage est atteinte, l'ionisation est déclenchée. Les diodes à gaz ont un meilleur rendement que les diodes à vide et les courants redressés sont notablement plus intenses.

5. Exercices de répétition (solutions page 494)

a) Qu'entendez-vous par le therme de « ionisation de choc » ?
b) Expliquez la différence qu'il y a entre la tension d'allumage et la tension de décharge d'un tube ionique.
c) Quelle est la signification de la tension d'extinction ?
d) Dessinez le diagramme $U - I$ d'un tube à lueur. Indiquez, sur le dessin, les valeurs caractéristiques des courants et des tensions.
e) Dessinez le schéma de principe d'un stabilisateur de tension, simple, comportant un tube à lueur.
f) Décrivez la différence existant entre un tube-relais et un thyratron.
g) Dessinez la caractéristique de commande d'un thyratron en tenant compte des dispersions qui peuvent survenir.
h) Le temps d'intégration, indiqué, d'un thyratron est de 3 s. Le courant anodique de pointe atteint 25 A. Le courant d'anode moyen, maximal, ne doit pas dépasser 6 A. Toutes les 5 s le thyratron est allumé pendant 2 s. Quelle est la valeur du courant admissible pendant ces 2 s d'allumage ?
i) Quelle importance le temps de désionisation d'un thyratron a-t-il par rapport à la détermination d'un circuit ?
k) Expliquez le processus de l'allumage d'un thyratron.
l) Où les ignitrons sont-ils principalement utilisés ?
m) Quels sont les avantages des diodes à gaz par comparaison aux diodes à vide ?

VII. Le tube à rayons cathodiques

1. Introduction

Le tube à rayons cathodiques – souvent nommé : tube cathodique – permet de rendre visibles des phénomènes électriques. Un tube cathodique donne, quasi instantanément, la trace des variations d'une tension sur son écran. Par conséquent, ces tubes sont utilisés principalement dans les appareils de mesure. L'oscilloscope à rayons cathodiques permet la visualisation de processus électriques de tous genres. Sans lui, les appareils de radar seraient impensables puisque sur leur écran la zone surveillée devient visible. Les grandes installations de transmission sont souvent équipées de tubes cathodiques afin d'en surveiller le fonctionnement. Le « cœur » de chaque appareil de télévision est un tube cathodique sur lequel l'image apparaît. Ces exemples montrent que parmi les composants de l'électronique, le tube cathodique occupe une place très importante.

2. Que savez-vous au sujet du tube à rayons cathodiques ? (solutions page 497)

a) Quels sont les principaux composants du système des électrodes d'un tube à rayons cathodiques ?
b) Qu'est-ce qu'un tube cathodique à déviation électrostatique ?
c) Comment travaille un tube dont la déviation du faisceau est électromagnétique ?
d) Quel est l'appareil de mesure le plus couramment employé en électrotechnique qui utilise un tube à rayons cathodiques ?

3. Le tube à rayons cathodiques

a. Définition

Le *tube à rayons cathodiques* est un tube électronique qui, au moyen de son système d'électrodes, produit un faisceau très finement concentré (composé d'électrons) qui se présente sous la forme d'un point sur son écran fluorescent. La position de ce point peut être modifiée par la déviation électrostatique ou électromagnétique du faisceau ; de plus, sa luminosité est modifiable au moyen d'une tension de commande.

b. Symbole

La figure 362 montre le symbole d'un tube à rayons cathodiques élémentaire.

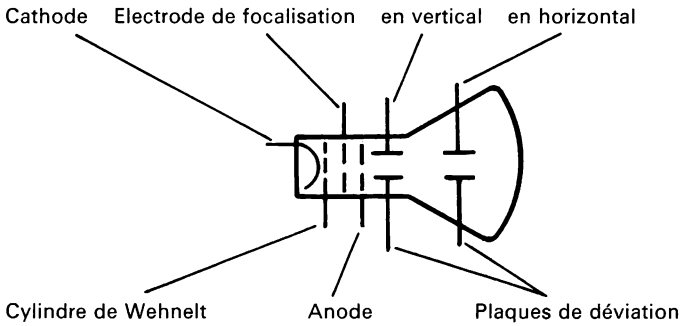


Figure 362

c. Construction

La figure 363 nous montre la construction d'un tube à rayons cathodiques.

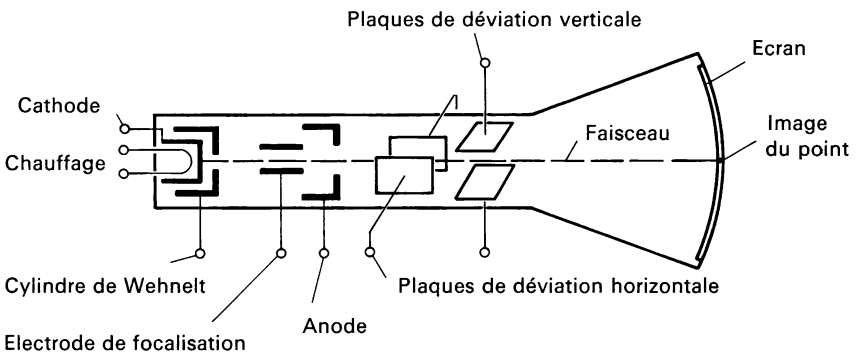


Figure 363

Le tube à faisceau électronique se compose d'un système d'électrodes produisant un flux d'électrons fortement concentré, d'un système de déviation du faisceau par des plaques ou des bobines et d'un écran sur lequel le faisceau devient visible. Le système produisant le flux d'électrons, nommé *canon à électrons*, se compose d'une cathode à chauffage indirect, d'une grille de forme cylindrique et d'une *optique électronique*. La cathode est formée par un petit tube de nickel qui porte la couche émissive sur sa face frontale. La cathode est entourée d'une grille de commande dont la forme est celle d'un cylindre.

Sur la face frontale de ce cylindre – nommé *cylindre de Wehnelt* – un petit trou permet le passage du faisceau. L'intensité de ce dernier, et par conséquent la luminosité du point sur l'écran, est réglée par l'application d'une tension négative sur le cylindre de Wehnelt. Le faisceau qui sort du cylindre de Wehnelt, par suite de la répulsion mutuelle des électrons, a une fâcheuse tendance à se disperser. Un faisceau électronique, tout comme un rayon lumineux en optique, peut être focalisé et dévié. Ici, les lentilles sont remplacées par des champs électromagnétiques ou électrostatiques. Les tubes à rayons cathodiques, tels que ceux employés dans la technique des mesures, utilisent le plus souvent des champs électrostatiques pour opérer la focalisation et la déviation du faisceau. L'*optique électronique* se compose de deux cylindres ou de deux électrodes de forme annulaire. La première de ces électrodes reçoit une tension positive variable. Elle sert à la focalisation – c'est-à-dire à l'ajustage ponctuel – de l'image du point. C'est la raison pour laquelle elle se nomme: *électrode de focalisation*. La seconde électrode assure la fonction d'une anode, elle reçoit un potentiel élevé et sert, entre autres, d'accélérateur du faisceau d'électrons. Les différences de potentiel entre l'électrode de focalisation et l'anode provoquent l'établissement de champs électrostatiques qui agissent sur le faisceau d'électrons comme des lentilles sur un rayon lumineux. L'électrode de focalisation, conjointement avec l'anode, a le même effet qu'une loupe qui concentre les rayons du soleil sur un point. Le faisceau d'électrons est focalisé sur l'écran du tube. La netteté de l'image est ajustée en variant la tension de l'électrode de focalisation. Le faisceau traverse la zone des plaques de déviation avant d'atteindre l'écran. Dans cette zone, un champ électrique agit sur le faisceau lorsqu'il passe entre les deux paires de plaques de déviation. L'une de ces paires de plaques dévie le faisceau sur un plan horizontal tandis que l'autre agit sur lui dans le plan vertical. Si l'on applique un potentiel positif à l'une des plaques le faisceau est alors dévié vers elle. Au moyen d'une source de tension continue, variable, appliquée à chaque paire de plaques on peut amener le point lumineux sur une position quelconque de l'écran. La figure 364 montre ces possibilités.

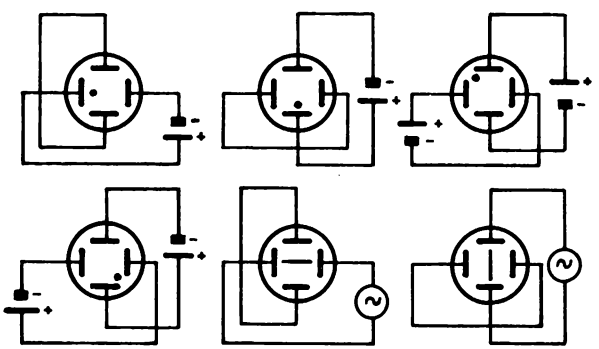


Figure 364

Le faisceau d'électrons arrive avec une vitesse suffisamment grande sur le matériau de la couche sensible de l'écran pour que celui-ci devienne luminescent. La couleur émise par l'écran dépend du matériau de revêtement dont la couche sensible est composée.

d. Fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la cathode ne diffère guère de celui d'un tube ordinaire dont la cathode est à chauffage indirect. Dans le tube cathodique, la couche active n'est déposée que sur la partie frontale du petit tube composant la cathode. Grâce à cette mesure, le faisceau ne peut être émis que vers l'avant. Le cylindre de Wehnelt du tube cathodique possède une action comparable à la grille de commande d'un tube amplificateur ordinaire. En variant le potentiel négatif du cylindre de Wehnelt, l'intensité du rayonnement est commandée, par conséquent la luminosité de l'image l'est aussi. L'effet de focalisation de l'optique électronique provient de l'influence exercée par les lignes du champ électrique sur le faisceau d'électrons. Le faisceau est dévié par un champ électrique. La déviation du faisceau par l'optique électronique est visible sur la figure 365.

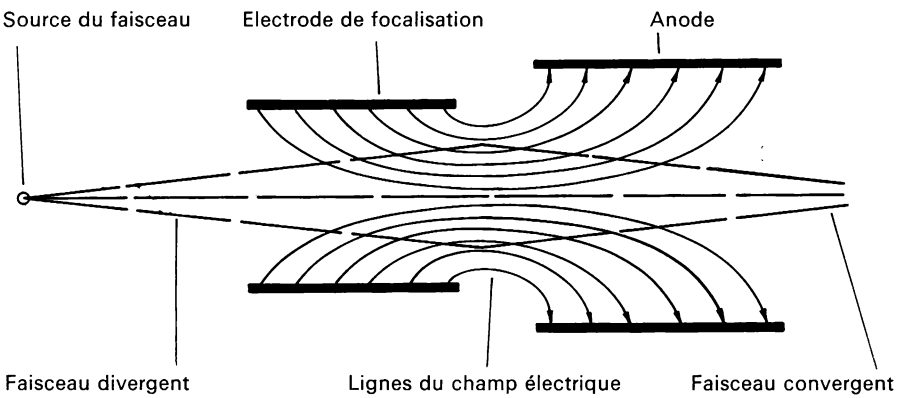


Figure 365

Un champ électrostatique se forme parce qu'il existe une différence de potentiel entre l'électrode de focalisation et l'anode. Les lignes de force de ce champ – dessinées sur la figure 365 – provoquent la concentration désirée du faisceau cathodique divergent. La forme du cheminement des lignes de force dépend de la différence de potentiel entre les deux électrodes. Si l'on change la tension de l'électrode de focalisation l'allure des lignes de force se modifie, et par conséquent, le degré de la déviation du faisceau varie également. La tension de l'électrode de focalisation est choisie de façon à ce que tous les électrons du faisceau atteignent le même point de l'écran.

Les *plaques de déviation* ont pour fonction de dévier le faisceau tant sur le plan horizontal que vertical. La figure 366 montre le processus de la déviation.

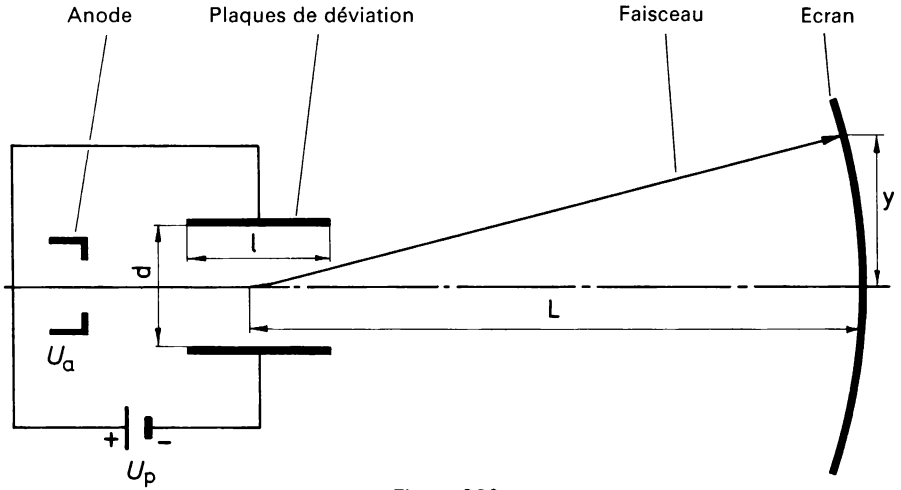


Figure 366

La déviation Y du faisceau dépend des dimensions géométriques du système des électrodes, de la tension d'anode et de la tension sur les plaques de déviation. La déviation du faisceau est *proportionnelle* à la tension sur les plaques de déviation.

$$Y = \frac{l \cdot L \cdot U_p}{2d \cdot U_a}$$

e. Données techniques

Sensibilité de déviation A_E

La *sensibilité de déviation* correspond au quotient de la déviation par la tension sur les plaques de déviation.

$$A_E = \frac{Y}{U_p};\ [A_E] = \frac{cm}{V}$$

Y = Déviation
U_p = Tension sur les plaques de déviation

Coefficient de déviation A_F

Le *coefficient de déviation* est l'inverse de la sensibilité de déviation.

$$A_F = \frac{U_p}{Y};\ [A_F] = \frac{V}{cm}$$

Dans la pratique, il est d'usage courant de travailler avec le coefficient de déviation. Celui-ci n'est pas le même pour les deux paires de plaques. La paire de plaques, la plus proche de la cathode, présente un plus petit coefficient de déviation.
Sur le tableau 18, les données techniques d'un tube à rayons cathodiques du type utilisé pour les mesures sont rassemblées.

Type : DG 7 – 12 c

Tension de chauffage U_f	6,3	V
Courant de chauffage I_f	0,3	A
Tension anodique U_a	2000	V
Tension sur l'électrode de focalisation	150 ... 250	V
Tension sur le cylindre de Wehnelt U_{g1}	–40 ... –75	V
Coefficient de déviation pour la paire de plaques côté de la cathode A_{Fpk}	65 ... 92	V/cm
Coefficient de déviation pour les plaques du côté de l'écran A_{Fps}	82 ... 125	V/cm
Déviation utilisable	65	mm

Tableau 18

4. Exemple

Le tube à rayons cathodiques DG 7 – 12 c, dont les caractéristiques sont données par le tableau 18, est utilisé dans un oscilloscope pour observer des tensions alternatives. Avec les tensions d'alimentation qui sont données, il en résulte les coefficients de déviation suivants :

- $A_{F_{pk}} = 80$ V/cm
- $A_{F_{ps}} = 110$ V/cm

Une tension en dents de scie est appliquée à la paire de plaques de la déviations horizontale, selon la figure 367.

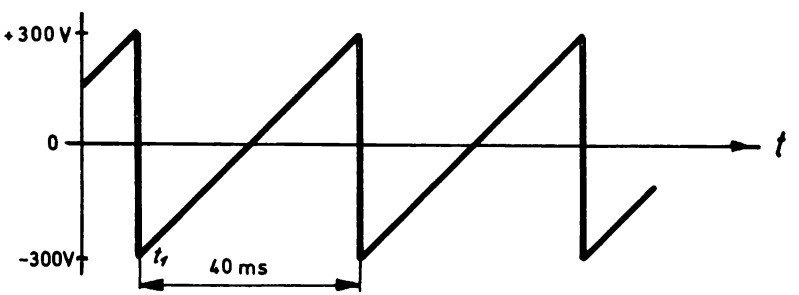


Figure 367

Sur la paire de plaques du côté de la cathode, une tension sinusoïdale de 50 Hz, 120 V_{eff} est appliquée. Dessiner, à l'échelle 1 : 1, l'image qui apparaît sur l'écran de l'oscilloscope pour le cas où t_1 coïncide avec le début de l'oscillation sinusoïdale.

Marche à suivre:

Première étape : dessiner le cercle ayant le diamètre de la déviation utilisable

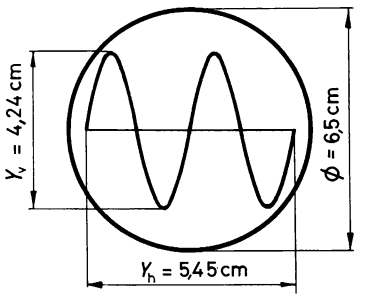


Figure 368

Deuxième étape : calculer la déviation horizontale

- écrire la formule $A_{F_{ps}} = \frac{U_p}{Y_h}$
- extraire Y_h de la formule $Y_h = \frac{U_p}{A_{F_{ps}}}$
- introduire les valeurs et calculer $Y_h = \frac{600}{110} \frac{V}{V/cm}$

  Y_h = **5,45 cm**
- dessiner la déviation sur la figure 368

Troisième étape : calculer la déviation verticale

- écrire la formule $A_{F_{pk}} = \frac{U_p}{Y_v}$
- extraire Y_v de la formule $Y_v = \frac{U_p}{A_{F_{ps}}}$
- introduire les valeurs et calculer $Y_v = \frac{120 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{80} \frac{V}{V/cm}$

  Y_v = **4,24 cm**
- dessiner la déviation sur la figure 368

Quatrième étape : construction de l'image observée sur l'oscilloscope
Puisque le temps de la déviation horizontale est de 40 ms et qu'une période de la tension sinusoïdale de 50 Hz = 20 ms, deux oscillation complètes seront représentées.

5. L'essentiel

Les tubes à rayons cathodiques servent à visualiser des phénomènes électriques.
Le système des électrodes du tube comprend une cathode qui est la source d'électrons, un cylindre de Wehnelt qui règle l'intensité du faisceau, une optique électronique pour le focaliser, deux paires de plaques pour effectuer la déviation verticale et horizontale enfin un écran qui permet de visualiser le faisceau.
La luminosité (intensité du faisceau) peut être modifiée à volonté en variant la tension négative du cylindre de Wehnelt.
L'ajustage de la finesse de l'image (focalisation) s'effectue à l'aide de l'optique électronique qui reçoit une tension réglable. Dans l'oscilloscope à rayons cathodiques ces tensions sont ajustables au moyen de potentiomètres de réglage.
Dans les tubes à déviation électrostatique, le faisceau est dévié horizontalement et verticalement par une paire de plaques pour chaque plan.
Le coefficient de déviation correspond au rapport entre la tension de déviation et la déviation du faisceau, il est donné en volts par centimètre. La tension nécessaire pour provoquer une déviation déterminée du faisceau se calcule à l'aide du coefficient de déviation.

6. Exercices de répétition (solutions page 497)

a) La luminosité d'un tube à rayons cathodiques peut être variée. Expliquez-en le procédé.
b) Expliquez par quel dispositif il est possible de focaliser le faisceau.
c) Une tension continue de 250 V est appliquée sur la paire de plaques de la déviation horizontale. Le point lumineux est dévié de 4 cm depuis le centre vers la droite. Quelle est la polarité de la source de tension qui est appliquée sur la plaque de droite ? Calculez le coefficient de déviation du tube.
d) Vous observez sur un écran l'image représentée par la figure 369.

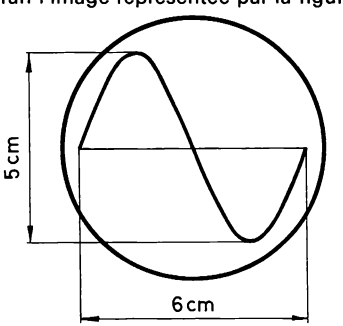


Figure 369

Le coefficient de déviation des plaques de la déviation horizontale est de 70 V/cm, celui des plaques de la déviation verticale est de 60 V/cm. La fréquence du signal arrivant sur les plaques de la déviation verticale est de 150 Hz. Dessinez, en un diagramme linéaire, les tensions sur les plaques de la déviation horizontale et verticale. Indiquez les valeurs des amplitudes et des temps correspondants.

VIII. Désignation des tubes

1. Introduction

En Europe, les tubes électroniques sont désignés de manière uniforme. La désignation du type d'un tube donne des renseignements concernant son chauffage et son système d'électrodes. Le code de désignation des tubes est présenté par le tableau 19.

2. Code de désignation des tubes à vide

Première lettre : chauffage		Autres lettres : système des électrodes	
A	4 V	A	Diode (redresseur haute fréquence)
B	180 mA	B	Double diode (redresseur haute fréquence)
C	200 mA	C	Triode (amplificateur de tension)
D	1,2 V	D	Triode (amplificateur de puissance)
E	6,3 B	E	Tétrode (amplificateur de tension)
F	12,6 V	F	Pentode (amplificateur de tension)
H	150 mA	H	Hexode, heptode
K	2 V	K	Octode
L	–	L	Pentode, tétrode (amplificateur de puissance)
M	2,4 . . . 2,8 V	M	Tube à écran fluorescent (œil magique)
P	300 mA	P	–
U	100 mA	U	–
V	50 mA	V	–
X	600 mA	X	Tube à gaz, redresseur biplaque
Y	450 mA	Y	Tube redresseur monoplaque (réseau)
Z	Cathode froide	Z	Tube redresseur biplaque (réseau)

Tableau 19

3. Exemples

ECH 21 = Triode-hexode, tension de chauffage 6,3 V ; le nombre 21 désigne une série particulière ayant un socle particulier

PCC 88 = Double triode pour amplification de tension, courant de chauffage 300 mA

UF 85 = Pentode pour amplification de tension, courant de chauffage 100 mA

PL 82 = Pentode pour amplification de puissance, courant de chauffage 300 mA

APPENDICE

(Réponses aux questions dans le texte)

1. Que savez-vous de ce qui concerne la matière?

Réponses aux questions a à f (page 11)

a) La charge d'un électron est négative.
b) Les protons se trouvent principalement dans le noyau des atomes.
c) Oui, les neutrons sont aussi présents dans le noyau des atomes.
d) L'atome est la plus petite unité d'un élément chimique.
e) Oui, les ions permettent principalement le flux du courant dans les tubes à atmosphère gazeuse.
f) Oui, l'oxygène est un élément chimique (symbole = O). L'oxygène est l'un des éléments les plus répandus, il est gazeux et représente une part importante de l'atmosphère terrestre.

Appréciation:

5 ou 6 réponses exactes:	Vous êtes déjà bien au courant en ce qui concerne la structure de la matière. L'étude de l'enseignement qui est offert affermira votre savoir.
3 ou 4 réponses exactes:	L'enseignement qui est offert ne vous est certainement pas étranger, grâce à vos connaissances vous pourrez l'assimiler facilement.
1 ou 2 réponses exactes:	Vous avez déjà entendu parler de ce qui concerne la structure de la matière, cela vous intéressera sûrement de compléter vos connaissances. Etudiez consciencieusement les chapitres suivants.
Aucune réponse exacte:	Vous entrez dans un domaine inconnu. Lisez plusieurs fois la matière exposée, elle éveillera sûrement votre attention. Il n'est pas nécessaire que vous possédiez déjà quelques rudiments pour traiter l'enseignement présenté. Mettez-vous tranquillement et à fond au courant de ce nouveau domaine. Vous constaterez bientôt que vous êtes capable de maîtriser ce nouvel enseignement. L'enrichissement de votre savoir vous procurera de la satisfaction.

2. Exercices de répétition concernant « I. La nature de la matière »

Réponses aux questions a à l (page 15)

a) La molécule est la plus petite particule d'un corps pur qui puisse exister à l'état libre sans perdre les propriétés de la substance originelle.

b)

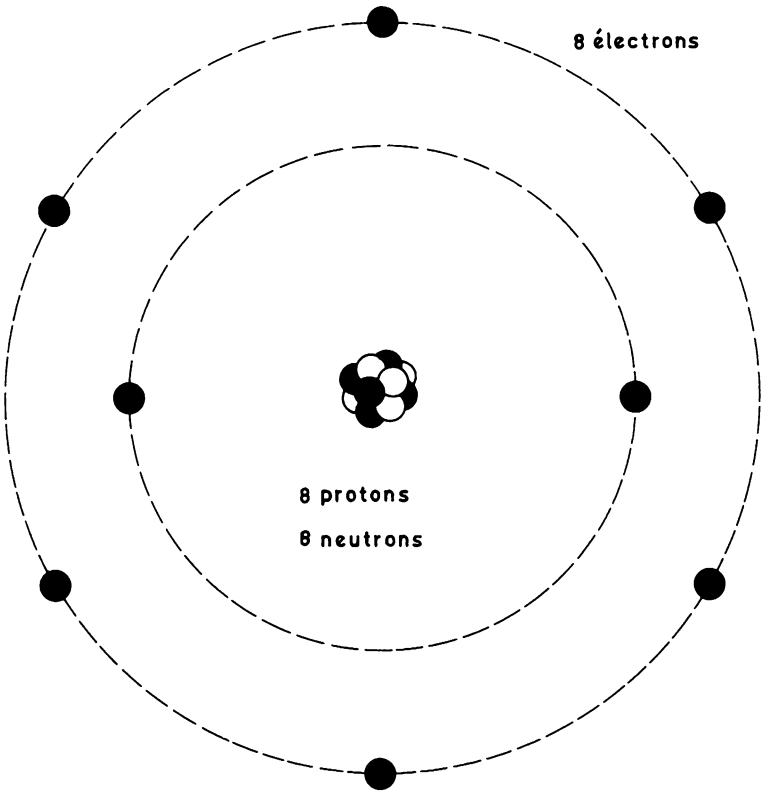


Figure pour 2 b

c) Un élément chimique est un constituant simple de la matière. Cet élément simple est composé d'atomes identiques.
d) Il existe un peu plus de cent éléments chimiques.
e) Les trois particules élémentaires principales sont :
l'*électron*, chargé négativement, environ 2000 fois plus léger que le proton ;
le *proton*, dont la charge est égale à celle de l'électron mais positive ;
le *neutron*, sans charge, dont la masse est environ égale à celle du proton.
f) Lorsque l'équilibre des charges, entre la charge du noyau et la charge des électrons qui tournent autour du noyau, est rompu, il se forme un ion.
g) Les anions sont des ions chargés négativement, l'atome présente un surplus d'électrons.
Les cations sont des ions chargés positivement, l'atome présente un manque d'électrons.

h) En électrotechnique, les ions jouent un rôle important en électrolyse et dans les tubes à décharge gazeuse.
i) Les protons, chargés positivement, sont retenus par les forces nucléaires du noyau. Ces forces nucléaires d'attraction sont considérablement plus importantes que les forces de répulsion dues aux charges électriques.
k) Deux forces agissent sur les électrons tournant autour du noyau. Ce sont celles de l'attraction électrique des protons du noyau et la force centrifuge. Les deux forces sont égales et de sens contraire, il s'ensuit qu'elles s'annulent.
l) Oui, jusqu'à ce jour, environ dix particules élémentaires sont connues.

Dans le cas où vous auriez répondu juste aux onze questions, vous pouvez commencer l'étude du prochain paragraphe.
Toutefois, si vos réponses comportaient quelques erreurs relisez lentement le paragraphe qui s'y rapporte. Vous ne pouvez pas tourner les prochaines pages avant d'avoir répondu correctement à toutes les questions. Cependant, rappelez-vous que les réponses apprises par cœur n'ont pas grande valeur et s'oublient facilement. Vous devez vraiment avoir compris la matière traitée. Celui qui continue de lire, sans avoir assimilé les connaissances enseignées, celui-là construit sur du sable. Dans les premiers chapitres vous acquérez les connaissances de base.

3. Que savez-vous au sujet de l'électricité?

Réponses aux questions a à f (page 16)
a) Oui, le cuivre est un excellent conducteur de l'électricité.
b) Un isolant ne conduit pas le courant électrique.
c) Dans un conducteur métallique, les électrons sont les porteurs du courant électrique.
d) Dans un circuit électrique, les sources de tension sont la cause du flux du courant. Les sources de tension les plus répandues sont les batteries sèches, les accumulateurs et les générateurs.
e) Un courant électrique dans les gaz est possible. Les électrons comme les ions, peuvent prendre part au flux du courant. Le tube au néon peut être mentionné comme exemple pratique.
f) Les exemples les plus connus de l'écoulement du courant dans les liquides sont: l'accumulateur et en galvanotechnique, la galvanisation.

Appréciation:

5 ou 6 réponses exactes:	Très bien, lisez tout de même le sujet de part en part, attentivement; on n'a jamais fini d'apprendre.
3 ou 4 réponses exactes:	Vous disposez des connaissances préliminaires nécessaires pour comprendre et travailler la nouvelle matière.

Moins de 3 réponses exactes :	Relisez à fond le paragraphe concernant la nature de la matière, il vous donne la réponse à 3 des questions posées. Pensez-y, celui qui ne connaît pas les bases fondamentales n'acquerra jamais de solides connaissances.

4. Exercices de répétition concernant « II. Electricité »

Réponses aux questions a à h (page 18)

a) Par le terme de gaz d'électrons on entend l'ensemble des électrons présents qui se déplacent librement dans un conducteur.
b) Un conducteur présente un grand nombre d'électrons libres, c'est un bon conducteur du courant électrique ; un non-conducteur (isolant), au contraire, ne possède pas d'électrons libres et par conséquent il ne conduit pas le courant électrique.
c) Les transistors et les diodes semiconductrices sont composés de matériaux semiconducteurs. Ces composants ont permis un développement insoupçonné de l'électronique.
d) Pour qu'un courant électrique puisse s'écouler, une différence de potentiel doit être à disposition et les deux potentiels opposés doivent être reliés, l'un avec l'autre, par un conducteur.
e) Les porteurs du courant électrique sont les électrons et les ions.
f) Dans les corps solides, le courant électrique est constitué par un flux d'électrons mais, par contre, dans les liquides ce sont des ions qui se déplacent.
g) Dans un bon conducteur, l'action du courant électrique se propage avec une vitesse proche de celle de la lumière.
h) Des différences de potentiel sont produites principalement dans les batteries sèches, les accumulateurs et les générateurs.

Huit réponses exactes vous donnent le « feu vert » pour l'étude du paragraphe suivant.
Celui qui n'a pas répondu exactement dans le sens voulu devrait reprendre l'étude de cette matière. Ce qui est perdu au début du cours ne se laisse que difficilement rattraper par la suite.

5. Que savez-vous au sujet du circuit électrique ?

Réponses aux questions a à g (page 19)

a) Lorsque dans un conducteur, des électrons ou des ions se déplacent dans le même sens, nous parlons d'un courant électrique.
b) Afin qu'un courant électrique puisse s'écouler, une différence de potentiel doit être présente et le circuit doit être fermé.
c) La différence de potentiel est la cause initiale de l'écoulement d'un courant électrique.

d) La tension électrique se mesure avec l'unité qui s'appelle « volt ».
e) La loi d'ohm donne la relation qui existe entre la tension, le courant et la résistance dans un circuit fermé. La formule de base est: $U = I \cdot R$.
f) L'unité de résistance électrique est l'ohm.
g) Il fond lorsque le courant qui le traverse est plus élevé que celui pour lequel il est calibré. Par conséquent, le fusible protège les lignes et les appareils d'un courant excessif.

Appréciation:

6 ou 7 réponses exactes:	Très bon, vous êtes bien au courant. Les exemples de calcul affermiront encore vos connaissances.
4 ou 5 réponses exactes:	Vous avez de bonnes connaissances préliminaires, ce nouveau sujet va certainement vous intéresser: avant tout, exercez-vous à résoudre avec application les problèmes qui sont proposés. Il y a quelque chose qui doit être tout nouveau pour vous, poursuivez avec ardeur l'étude du prochain paragraphe.
Moins de 3 réponses exactes:	Halte! ne continuez pas de lire avant que vous n'ayez repris l'étude de la matière traitée dans le chapitre « II. L'électricité ». Relisez avec attention le paragraphe précédent, ce qui vous permettra de répondre correctement aux trois premières questions.

6. Exercices de répétition concernant « III. Le circuit électrique »

Réponses aux questions a à h (page 30)

a) Dans le système Giorgi, les quatre unités nécessaires en électrotechnique sont: le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère.

$1\,\mu A = 1 \cdot 10^{-6}$ A	$1\,\mu V = 1 \cdot 10^{-6}$ V
1 mA $= 1 \cdot 10^{-3}$ A	1 mV $= 1 \cdot 10^{-3}$ V
1 kA $= 1 \cdot 10^{3}$ A	1 kV $= 1 \cdot 10^{3}$ V
1 MA $= 1 \cdot 10^{6}$ A	1 MV $= 1 \cdot 10^{6}$ V

c) La conductance est l'inverse de la résistance. Elle se mesure en « siemens ».
d) La puissance électrique est mesurée en « watt ». Un watt est égal à un volt multiplié par un ampère.
e) La tension est l'équivalent de la pression dans un circuit hydraulique, elle se mesure en « volt ». Le courant est comparable à la quantité d'eau qui s'écoule par unité de temps, il se mesure en « ampère ». La résistance est similaire à celle due au frottement dans une conduite d'eau, son unité de mesure est « l'ohm ».
f) *Marche à suivre:*

Première étape: calcul de la tension U

– écrire la formule de base — $U = I \cdot R$
– introduire les valeurs et calculer — $U = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{3}$ $\quad A\frac{V}{A}$
$U = 240$ V

Deuxième étape : calcul de la puissance P

– écrire la formule de base

$$P = U \cdot I$$

– introduire les valeurs et calculer

$$P = 240 \cdot 20 \cdot 10^{-3}\ \text{VA}$$

$$P = 4{,}8\ \text{W}$$

Troisième étape : calcul du travail

– écrire la formule de base

$$W = P \cdot t$$

– introduire les valeurs et calculer

$$W = 4{,}8 \cdot \frac{25}{60}\ \text{Wh}$$

$$W = 2{,}0\ \text{Wh}$$

Quatrième étape : calcul de la conductance

– écrire la formule de base

$$G = \frac{1}{R}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$G = \frac{1}{12 \cdot 10^{3}};\ \text{S}$$

$$G = 0{,}083 \cdot 10^{-3}\ \text{S}$$

$$G = \mathbf{83{,}3}\ \mu\text{S}$$

g) *Marche à suivre:*

Première étape : calculer la puissance dans R_1

– écrire la formule de base

$$P = U \cdot I$$

– écrire la loi d'ohm selon I

$$I = \frac{U}{R}$$

– introduire l'expression de I dans la formule de base

$$P = \frac{U^2}{R}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$P = \frac{20 \cdot 20}{10 \cdot 10^{3}}\ \frac{\text{V} \cdot \text{V} \cdot \text{A}}{\text{V}}$$

$$P = 40 \cdot 10^{-3}\ \text{W}$$

$$P = \mathbf{40\ mW}$$

Deuxième étape : calculer le courant I_2

– écrire la formule de base

$$U = I \cdot R$$

– extraire I_2 de la formule

$$I_2 = \frac{U}{R_1}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$I_2 = \frac{20}{10 \cdot 10}\ \frac{\text{VA}}{\text{V}}$$

$$I_2 = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{A}$$

$$I_2 = \mathbf{2\ mA}$$

Troisième étape : calculer le courant I_3

– écrire la formule de base $I_3 = I_1 - I_2$

– introduire les valeurs et calculer $I_3 = 6 - 2\ \text{mA}$

$I_3 = \mathbf{4\ mA}$

Quatrième étape : calculer R_2

– écrire la formule de base $U = I \cdot R$

– extraire R de la formule $R_2 = \dfrac{U}{I_3}$

– introduire les valeurs et calculer $R_2 = \dfrac{20}{4 \cdot 10^{-3}} \dfrac{\text{V}}{\text{A}}$

$R_2 = 5 \cdot 10^3 \Omega$

$R_2 = \mathbf{5\ k\Omega}$

Cinquième étape : calculer la puissance dans R_2

– écrire la formule de base $P = U \cdot I$

– introduire les valeurs et calculer $P = 20 \cdot 4 \cdot 10^{-3}\ \text{VA}$

$P = 80 \cdot 10^{-3}\ \text{W}$

$P = \mathbf{80\ mW}$

h) *Marche à suivre:*

Première étape : calcul de R_1

– écrire la formule de base $U = I \cdot R$

– extraire R de la formule $R_1 = \dfrac{U_1}{I_1}$

– introduire les valeurs et calculer $R_1 = \dfrac{125}{25 \cdot 10^{-3}} \dfrac{\text{V}}{\text{A}}$

$R_1 = 5 \cdot 10^3\ \Omega$

$R_1 = \mathbf{5\ k\Omega}$

Deuxième étape : calcul du courant I_3

– écrire la formule de base $I_1 = I_2 + I_3$

– extraire I_3 de la formule $I_3 = I_1 - I_2$

– introduire les valeurs et calculer $I_3 = 25 - 10\ \text{mA}$

$I_3 = \mathbf{15\ mA}$

Troisième étape : calcul de R_2

– écrire la formule de base $U = I \cdot R$

– extraire R de la formule $R_2 = \dfrac{U_2}{I_3}$

– introduire les valeurs et calculer $R^2 = \dfrac{150}{15 \cdot 10^{-3}} \dfrac{\text{V}}{\text{A}}$

$R_2 = 10 \cdot 10^3\ \Omega$

$R_2 = \mathbf{10\ k\Omega}$

Quatrième étape : calcul de la tension sur R_3

– écrire la formule de base
$$U = I \cdot R$$

– introduire les valeurs et calculer
$$U_{R3} = I_2 \cdot R_3$$
$$U_{R3} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{3}\ \text{A}\Omega$$
$$U_{R3} = \mathbf{100\ V}$$

Cinquième étape : calcul de la tension U_4

– écrire la formule de base
$$U_4 = U_2 - U_{R3}$$

– introduire les valeurs et calculer
$$U_4 = 150 - 100\ \text{V}$$
$$U_4 = \mathbf{50\ V}$$

Sixième étape : calcul de R_4

– écrire la formule de base
$$U = I \cdot R$$

– extraire R de la formule
$$R_4 = \frac{U_4}{I_2}$$

– introduire les valeurs et calculer
$$R_4 = \frac{50}{10 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$
$$R_4 = 5 \cdot 10^{3}\ \Omega$$
$$R_4 = \mathbf{5\ k}\Omega$$

Septième étape : calcul de la tension de la batterie

– écrire la formule de base
$$U_b = U_1 + U_2$$

– introduire les valeurs et calculer
$$U_b = 125 + 150\ \text{V}$$
$$U_b = \mathbf{275\ V}$$

Huitième étape : calcul des puissances dans R_1, R_2, R_3 et R_4

– écrire la formule de base
$$P = U \cdot I$$

– introduire les valeurs et calculer
$$P_{R1} = U_1 \cdot I_1$$
$$P_{R1} = 125 \cdot 25 \cdot 10^{-3}\ \text{VA}$$
$$P_{R1} = \mathbf{3{,}125\ W}$$

$$P_{R2} = U_2 \cdot I_3$$
$$P_{R2} = 150 \cdot 15 \cdot 10^{-3}\ \text{VA}$$
$$P_{R2} = \mathbf{2{,}25\ W}$$

$$P_{R3} = U_{R3} \cdot I_2$$
$$P_{R3} = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-3}\ \text{VA}$$
$$P_{R3} = \mathbf{1\ W}$$

$$P_{R4} = U_4 \cdot I_2$$
$$P_{R4} = 50 \cdot 10 \cdot 10^{-3}\ \text{VA}$$
$$P_{R4} = 500 \cdot 10^{-3}\ \text{W}$$
$$P_{R4} = \mathbf{500\ mW}$$

Au cas où vous auriez résolu les huit exercices sans erreur, votre très bon travail mérite une approbation.
Ces problèmes présentent, par expérience, les plus grandes difficultés. Le fait d'en venir à bout est toutefois très important pour comprendre la matière traitée. Seul, celui qui est capable de calculer un circuit électrique a saisi exactement les phénomènes qui s'y passent. Pour résoudre les problèmes il faudrait toujours procéder selon le même schéma de base :

1. Divisez les grands exercices en problèmes partiels.
2. Résolvez en premier les problèmes partiels.
3. Pour trouver la solution d'un problème partiel, cherchez-en la formule de base et transformez-la pour obtenir la valeur demandée.
4. Introduisez les valeurs dans la formule transformée et effectuez-en le calcul.
5. Pour chaque problème, faites la vérification des unités en reportant à droite du calcul numérique les unités correspondantes.

Afin de simplifier les calculs numériques, il est plus agréable d'utiliser les exposants de dix. Au lieu d'écrire un grand nombre de zéros on inscrit le nombre DIX dont l'exposant correspond au nombre de zéros.
Exemple : $1000 = 1 \cdot 10^3$, $3700 = 37 \cdot 10^2 \cdot$ $5670000 = 567 \cdot 10^4$.
Lorsque les nombres sont plus petits que UN, une règle semblable est valable. A la place d'un certain nombre de zéros après la virgule on écrit le nombre en question multiplié par DIX dont l'exposant, dans ce cas, est négatif. La valeur de l'exposant négatif correspond à la position du nombre après la virgule.
Exemple : $0{,}0001 = 1 \cdot 10^{-4}$, $0{,}0023 = 2{,}3 \cdot 10^{-3}$ ou $23 \cdot 10^{-4}$.
Le calcul, au moyen des puissances de dix économise du temps car lorsqu'il se présente sous forme fractionnaire il se simplifie. Nous retenons la règle suivante lors de calculs avec des fractions :
Les exposants positifs de dix au numérateur apparaissent avec un exposant négatif au dénominateur. Les exposants positifs de dix au dénominateur apparaissent avec un exposant négatif au numérateur.

Exemples : $\frac{5 \cdot 10^3}{7} = \frac{5}{7 \cdot 10^{-3}}$; $\frac{47 \cdot 10^{-2}}{36} = \frac{47}{36 \cdot 10^2}$

$$\frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 7 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^{-3}} = \frac{5 \cdot 7 \cdot 10^{-1}}{3 \cdot 10^{-5}} = \frac{5 \cdot 7}{3 \cdot 10^{-4}} = \frac{5 \cdot 7 \cdot 10^4}{3}$$

Au moyen de ces simples règles vous pouvez trouver la solution de la plupart des calculs. Familiarisez-vous avec ce mode de calculer, vous économiserez ainsi bien du temps.

7. Que savez-vous au sujet des éléments galvaniques ?

Réponses aux questions a à e (page 33)

a) Un élément galvanique se compose de deux électrodes et d'un électrolyte. Les éléments les plus communément utilisés ont des électrodes en

charbon et en zinc. L'électrode de charbon est entourée de bioxyde de manganèse contenu dans un sac de toile.
Le bioxyde de manganèse a pour effet d'empêcher – par fixation – l'hydrogène produit par la décomposition chimique de se déposer.
L'hydrogène étant un isolant empêcherait le flux du courant, c'est-à-dire que la résistance interne de l'élément augmenterait beaucoup.

b) La tension de service des éléments galvaniques – que l'on obtient couramment dans le commerce – est de 1,5 V par cellule.
c) Par le terme de « force électromotrice » des sources de tension, nous entendons la tension à vide, c'est-à-dire celle qui règne aux bornes de la source de tension lorsque cette dernière n'est pas chargée.
d) Un ion est un atome ou une molécule qui présente une charge électrique par rapport à l'extérieur.
e) Le cation s'écoule vers la cathode, c'est-à-dire vers l'électrode qui est reliée avec le pôle négatif de la source de tension.

Appréciation:

5 réponses exactes:	Très bien, vous avez de bonnes connaissances élémentaires, celles-ci vous permettrons d'assimiler facilement la matière enseignée.
4 ou 3 réponses exactes:	Vos connaissances sont bonnes, pensez cependant que les processus dans les électrolytes sont généralement trop peu connus. Cela vaut la peine d'étudier à fond ce paragraphe; vous pourrez utiliser plus tard les connaissances acquises.
Moins de 3 réponses exactes:	Vous n'avez pas encore bien travaillé la matière du paragraphe traitant la « nature de l'électricité ». Les réponses aux questions d et e ne devraient pas vous causer de difficultés. Relisez consciencieusement le paragraphe correspondant.

8. Exercices de répétition concernant « I. Eléments galvaniques »

Réponses aux questions a à i (page 38)

a) Un électrolyte est un liquide qui conduit le courant électrique. Ce liquide peut être rendu gélatineux par l'emploi d'une poudre.
b) Seuls des électrons sont transportés dans les conducteurs métalliques alors que, dans les électrolytes, des particules matérielles sont aussi entraînées par le courant.
c) Les électrodes de l'élément primaire le plus utilisé sont en charbon et en zinc.
d) L'électrode en charbon représente le pôle positif de l'élément.
e) La « force électromotrice » d'une source de tension est celle de sa tension à vide, c'est-à-dire la tension aux bornes de la source lorsque celle-ci n'est pas chargée (ne débite aucun courant).

f) Une chute de tension apparaît dans la résistance interne d'une source de tension ; elle est causée par le courant de charge. La tension de service de la source de tension est plus petite, de cette chute de tension, que la F.E.M.

g) Oui, la tension aux bornes d'un élément est dépendante de la charge. La chute de tension interne étant elle-même dépendante du courant de charge, la tension aux bornes est donc plus petite que la F.E.M.

h) *Marche à suivre:*

Première étape : calcul de la tension aux bornes

– écrire la formule de base	$U_K = I \cdot R_L$	
– introduire les valeurs et calculer	$U_K = 0{,}1 \cdot 10$	$\frac{AV}{A}$
	$U_K = 1\ V$	

Deuxième étape : calcul de R_i

– écrire la formule de base	$U_K = E - I \cdot R_i$	
– extraire R_i de la formule	$R_i = \frac{E - U_K}{I}$	
– introduire les valeurs et calculer	$R_i = \frac{1{,}5 - 1}{0{,}1}$	$\frac{V}{A}$
	$R_i = \mathbf{5}\ \Omega$	

i) *Marche à suivre:*

Première étape : écrire les formules des deux mesures et les égaler

– formule de base de la première mesure	$E = I_1 \cdot (R_1 + R_i)$
– formule de base de la deuxième mesure	$E = I_2 \cdot (R_2 + R_i)$
– égaler les deux formules l'une avec l'autre	$I_2 \cdot (R_2 + R_i) = I_1 \cdot (R_1 + R_i)$
– éliminer les parenthèses	$I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot R_i = I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot R_i$
– faire passer à gauche le membre contenant R_i	$I_2 \cdot R_i - I_1 \cdot R_i = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2$
– mettre R_i en facteur commun	$R_i \cdot (I_2 - I_1) = I_1 \cdot R_i - I_2 \cdot R_2$
– extraire R_i	$R_i = \frac{I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2}{I_2 - I_1}$
– introduire les valeurs et calculer	$R_i = \frac{2 \cdot 6 - 1 \cdot 14}{1 - 2}$
	$R_i = \mathbf{2}\ \Omega$

Avez-vous trouvé la réponse exacte pour les neuf exercices ? Dans l'affirmative vous pouvez passer à l'étude du prochain paragraphe.

Au cas où le dernier problème vous aurait causé des difficultés, ne vous laissez pas décourager pour autant. Notre intention était de poser le problème sous une forme quelque peu difficile. Cet exercice vous montre comment trouver la valeur inconnue – dans notre cas, la résistance interne – par un raisonnement logique et une disposition correcte des valeurs connues. La capacité de raisonner logiquement pour résoudre un problème, en partant de ce qui est connu pour trouver ce qui est inconnu, doit être systématiquement exercé.

Vous pourrez utiliser ce talent, avec succès, dans le domaine de l'électronique expérimentale. Si vous avez répondu à toutes les questions, à l'exception de la dernière, vous pouvez passer au sujet suivant. Toutefois, si vous avez encore fait d'autres erreurs il vous faut reprendre l'étude de la matière traitée.

9. Que savez-vous au sujet des accumulateurs ?

Réponses aux questions a à e (page 40)

a) L'accumulateur au plomb, non chargé, se compose de deux électrodes de sulfate de plomb qui plongent dans de l'acide sulfurique dilué. Pendant la charge, la plaque positive se transforme en peroxyde de plomb et la négative en plomb ; dès ce moment, la concentration en acide de l'électrolyte augmente.
b) Oui, la densité de l'acide, dans un accumulateur au plomb, donne la mesure de son état de charge car cette densité augmente pendant le processus de la charge.
c) La F.E.M. moyenne d'une cellule d'un accumulateur au plomb est de 2 V.
d) « L'ampèreheure » est la mesure de la capacité des accumulateurs. Le temps de décharge est multiplié par le courant moyen de décharge d'où il en résulte la capacité de l'accumulateur.
e) Oui, les cellules d'un accumulateur peuvent être reliées en série. Dans ce cas, la F.E.M. et la résistance interne de chacune des cellules s'additionnent.

Appréciation:

5 ou 4 réponses exactes :	Très bien, vous avez déjà certaines connaissances en ce qui concerne l'accumulateur, le paragraphe suivant vous permettra de les enrichir.
3 à 1 réponse exacte :	Vous avez déjà entendu parler des accumulateurs mais vos connaissances sont encore modestes, approfondissez-les en étudiant le paragraphe qui suit.
Aucune réponse exacte :	Pour vous, les accumulateurs sont quelque chose d'inconnu. Mais cette constatation ne doit pas vous décevoir, le paragraphe suivant est écrit pour vous permettre d'en faire plus ample connaissance.

10. Exercices de répétition concernant « II. Accumulateurs »

Réponses aux questions a à n (page 49)

a) L'électrolyte d'un accumulateur au plomb est de l'acide sulfurique dilué.
b) Dans un accumulateur au plomb, l'électrolyte évaporé est remplacé par de l'eau distillée.
c) Pendant la charge d'un accumulateur on ne doit pas s'en approcher avec une flamme à découvert. Pendant la dernière phase de la charge il se produit un dégagement de gaz qui crée un danger d'explosion.

d) La capacité des accumulateurs se mesure en ampèreheures (Ah).
e) Le rendement d'un accumulateur est indiqué en pourcent (%), on distingue le rendement en ampèreheures et celui en wattheures.
f) Le rendement en wattheures donne de meilleures valeurs de comparaison car, dans ce cas, les unités de travail sont comparées.
g) L'avantage principal des accumulateurs au fer-nickel est représenté par leur absence de surveillance ou, pour certains types, la surveillance minime qu'ils requièrent quand on les compare aux accumulateurs au plomb.
h) L'accumulateur au plomb présente un meilleur rendement que celui au fer-nickel.
i) L'accumulateur au plomb présente une résistance interne plus petite que celui au fer-nickel.
k) Oui, la densité de l'acide d'une cellule d'un accumulateur au plomb donne une mesure de son état de charge car elle augmente lorsque la charge croît.
l) Non, la densité de l'électrolyte ne donne pas une indication mesurable de l'état de charge d'un accumulateur au fer-nickel car la densité de l'électrolyte ne varie pas pendant la charge et la décharge.
m) Lors de la mise en série des cellules, les résistances internes s'additionnent de même que les F.E.M. Par conséquent, l'accumulateur présente une F.E.M. de 12 V et une résistance interne de 0,06 ohm. Si une résistance de charge dont la valeur choisie – égale à celle de la résistance interne – est reliée à la batterie, celle-ci fournira sa puissance maximale. Dans notre cas R_L sera de 0,06 ohm. Dans notre exemple, la différence de potentiel – ou tension aux bornes – tombe à la moitié de la F.E.M., elle sera donc de 6 V.
n) Le courant de court-circuit est déterminé par la résistance interne. En mettant 4 cellules en parallèle, la résistance interne tombe au quart de sa valeur mais la F.E.M. reste inchangée. Le courant de court-circuit, calculé selon la loi d'Ohm, sera de 6 A.

Ces exercices de répétition étaient simples, ils comprennent ce que vous devez savoir au sujet des accumulateurs et de leurs circuits. Si vous avez fait des erreurs en y répondant, c'est le signe que vous n'avez pas encore bien travaillé la matière enseignée. Dans ce cas, avant de poursuivre il vous faut charger « l'accumulateur » de vos connaissances de tout ce qui concerne les accumulateurs !

11. Que savez-vous au sujet des aimants permanents ?

Réponses aux questions a à d (page 51)

a) La boussole utilise le magnétisme terrestre. L'aiguille de la boussole s'oriente d'après le champ magnétique terrestre. Le pôle nord de l'aiguille indique approximativement le pôle nord géographique.

b) Des lignes de champ magnétiques apparaissent en n'importe quel point de l'espace situé entre deux pôles magnétiques.
c) Les lignes du champ magnétique peuvent être rendues visibles à l'aide de limaille de fer, saupoudrée sur une feuille de papier, sous laquelle on place un aimant ou un électroaimant.

Appréciation:

4 réponses exactes :	Très bien, vous avez certainement déjà entendu parler du magnétisme.
3 ou 2 réponses exactes :	Vos connaissances au sujet du magnétisme sont celles auxquelles on peut s'attendre d'une personne qui s'intéresse normalement aux questions techniques.
1 ou aucune réponse exacte :	Le magnétisme représente pour vous un nouveau domaine de la science. Le mécanisme des forces magnétiques n'est pas particulièrement difficile à comprendre.

12. Exercices de répétition concernant « I. Aimants permanents »

Réponses aux questions a à h (page 55)
a) Un champ magnétique est l'espace dans lequel les forces d'un aimant se manifestent.
b) Les aimants moléculaires sont la cause de l'action magnétique des aimants permanents. Lorsque tous les aimants moléculaires sont orientés dans le même sens, le corps concerné se comporte comme un aimant permanent.
c) Les lignes du champ magnétique sortent de l'aimant à son pôle nord et y rentrent à son pôle sud. Ainsi le parcours des lignes du champ est fermé.
d) Les lignes du champ magnétique peuvent être rendues visibles à l'aide de limaille de fer.
e) Dans le fer doux, la mobilité des aimants moléculaires est plus grande que dans l'acier trempé (acier dur) c'est pour cette raison qu'ils peuvent être facilement orientés. Les aimants moléculaires orientés sont à l'origine des propriétés magnétiques des aimants permanents.
f) Le flux magnétique est la somme de toutes les lignes de champ qui entrent ou qui sortent d'un pôle magnétique.
g) L'intensité magnétique est le nombre de lignes de force qui traversent perpendiculairement une section d'un centimètre carré.
h) Si un aimant droit est cassé en son milieu, il en résulte deux aimants droits indépendants.

A l'aide des exercices de répétition vous êtes en mesure de vérifier si vous pouvez continuer avec l'étude du paragraphe suivant. L'étude du chapitre concernant l'électromagnétisme présuppose la connaissance des bases relatives aux aimants permanents.

13. Que savez-vous concernant l'électromagnétisme?

Réponses aux questions a à e (page 56)

a) Les utilisations pratiques de l'électromagnétisme trouvent, entre autres, leurs applications dans les relais, les moteurs électriques, les transformateurs et les haut-parleurs.
b) Oui, un électroaimant alimenté avec du courant continu présente les mêmes propriétés qu'un aimant permanent.
c) Oui, dans un électroaimant, comme pour un aimant permanent, les mêmes lignes de champ apparaissent.
d) Un électroaimant se compose d'une bobine parcourue par du courant. Dans la plupart des cas un noyau de fer est nécessaire car le fer produit une concentration des lignes de force magnétiques.
e) L'intensité du champ d'un électroaimant dépend du nombre de spires de la bobine, de l'intensité du courant, de la longueur des lignes de force et de la matière composant le noyau.

Appréciation:

5 réponses exactes :	Très bien, vous êtes déjà en possession des connaissances fondamentales élémentaires concernant l'électromagnétisme. Ces bonnes bases vous permettront de comprendre ce vaste domaine.
3 à 4 réponses exactes :	Bien, les principes de base de l'électromagnétisme vous sont connus. Vous vous efforcerez certainement d'en savoir davantage sur ce sujet ; le paragraphe suivant vous permettra d'atteindre ce but.
2 à aucune réponse exacte :	Les manifestations de l'électromagnétisme sont nouvelles pour vous. Relisez attentivement le paragraphe concernant les aimants permanents. Là, les bases fondamentales présentées seront nécessaires pour une étude ultérieure. Ne vous laissez pas décourager par ce sujet vaste et très complexe. L'électromagnétisme est un chapitre difficile. Cependant, si vous étudiez lentement et successivement chaque paragraphe avec application, ce thème vous sera bientôt familier.

14. Exercices de répétition concernant « II. Electromagnétisme »

Réponses aux questions a à p (page 73)

a) Le champ magnétique, autour d'un conducteur rectiligne parcouru par du courant, forme des lignes de champ circulaires et concentriques.

b) Le champ magnétique est déterminé par l'intensité du courant dans le conducteur.
c) La règle du tire-bouchon nous aide à déterminer le sens de ce champ, elle s'exprime ainsi : si nous tournons un tire-bouchon, en progressant dans le sens du courant – à travers la feuille de papier – son sens de rotation indique celui du flux.
d) Dans le système Giorgi, l'intensité du champ magnétique se mesure en A/m ou en A/cm.
e) L'induction magnétique indique la densité des lignes de champ dans le circuit magnétique ; dans une bobine « sur l'air » (sans noyau magnétique), elle correspond à l'intensité du champ.
f) Dans le système Giorgi, l'induction magnétique se mesure en Vs/m^2 (Tesla).
g) La force magnétomotrice ou tension magnétique, du circuit magnétique, est analogue à la tension électrique d'un circuit électrique.
h) L'unité de mesure de la force magnétomotrice, dans le système Giorgi, est l'ampère ; dans les bobines c'est l'ampère-tour ($I \cdot N$).
i) Non, la perméabilité relative d'un matériau dépend de l'intensité du champ magnétique.
k) La constante d'induction est une constante naturelle, elle est utilisée nécessairement pour convertir les grandeurs magnétiques du système absolu dans le système Giorgi.
l) La perméabilité absolue est définie dans le sytème Giorgi. Elle résulte du produit de la perméabilité relative par la constante d'induction ($\mu = \mu_o \cdot \mu_r$).
m) La courbe d'hystérésis donne des indications concernant la grandeur de la rémanence et de la force coercitive.
n) Une grande rémanence et une grande force coercitive sont les signes d'un matériau magnétique dur. Ce matériau est propre à la fabrication d'aimants permanents.
o) Les matériaux magnétiques doux tels que le fer doux ont une rémanence et une force coercitive faibles. Les aimants élémentaires se meuvent relativement facilement. Un tel matériau conserve mal une aimantation. Le magnétisme résiduel s'élimine avec une faible dépense d'énergie.

p) *Marche à suivre:*

Première étape : calcul de l'induction magnétique dans l'entrefer

– écrire la formule de base $U_m = \Phi \cdot R_m$

– extraire Φ de la formule $\Phi = \dfrac{U_m}{R_m}$

– remplacer Φ par $B \cdot A$ et extraire B $B = \dfrac{U_m}{R_m \cdot A}$

– écrire la formule qui donne R_m $\quad R_m = \dfrac{l_L}{\mu_o \cdot A} + \dfrac{l_E}{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A}$

l_L, l_E = longueur des circuits magnétiques dans l'air et dans le fer

– additionner les deux formules $\quad R_m = \dfrac{\mu_r \cdot l_L + l_E}{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A}$

– introduire la formule de R_m dans celle de B $\quad B = \dfrac{U_m}{A \cdot R_m} = \dfrac{U_m \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A}{(\mu_r \cdot l_L + l_E) A}$

– simplifier $\quad B = \dfrac{U_m \cdot \mu_o}{l_L + \dfrac{l_E}{\mu_r}}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad B = \dfrac{1{,}5 \cdot 800 \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-8}}{0{,}5 + 20} \dfrac{\text{A} \cdot \text{Vs}}{\text{A} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}}$

$B = 2{,}77\ 10^{-5}\ \text{Vs/cm}^2$

Deuxième étape : calcul de la tension induite dans le conducteur

– écrire la formule de base $\quad U_i = B \cdot l \cdot v$

– introduire les valeurs et calculer $\quad U_i = 2{,}77 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 1 \cdot 10^3 \dfrac{\text{Vs} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2\ \text{s}}$

$U_i = \mathbf{0{,}111\ V}$

Remarques concernant la résolution du problème:

La résistance magnétique se partage en deux tronçons : la résistance dans le fer et celle dans l'air. Ces deux résistances sont analogues à celles qui sont en série dans un circuit électrique et par conséquent elles s'additionnent. La longueur du conducteur mobile est déterminée par la largeur de l'entrefer puisque, seule, une tension est induite dans le tronçon du conducteur qui coupe le flux magnétique.

Ces exercices de répétition vous donnent un reflet du niveau de vos connaissances concernant le magnétisme. Selon nos expériences nous savons que, pour plusieurs d'entre vous, ce sujet présente des difficultés. Le grand nombre d'unités de mesure du système absolu et l'étendue de ce domaine en sont responsables. A cela s'ajoute le praticien superficiel sans grandes connaissances des phénomènes du magnétisme. Toutefois, celui qui se donne vraiment la peine de comprendre ce qui se passe dans les appareils électroniques ne doit, en tous cas pas, renoncer à une étude approfondie du magnétisme. Au cas où vous n'auriez pas pu résoudre tous les problèmes, reprenez l'étude de ce sujet : cela sera « payant » par la suite, au cours de votre instruction.

15. Que savez-vous concernant les fonctions trigonométriques?

Réponses aux questions a à f (page 75)

a) Les quatre fonctions trigonométriques les plus utilisées sont: le sinus, le cosinus, la tangente et la cotangente.

b) Les mesures angulaires les plus courantes sont: l'arc (la circonférence = 2π) et le degré (la circonférence = 360°).

c) Le cercle unitaire est celui dont le rayon = « UN ». On l'utilise pour l'estimation graphique des fonctions trigonométriques et pour visualiser le résultat de fonctions trigonométriques.

d) Les fonctions trigonométriques jouent un rôle dans la plupart des problèmes où le déphasage intervient lors de calculs concernant les courants alternatifs. Quelques exemples: le cos φ permet de calculer les puissances effectives (ou réelle le sin φ sert à calculer la puissance réactive, tg δ donne une mesure de la qualité des composants des circuits oscillants, etc.

e) Il faut connaître deux côtés d'un triangle rectangle.

f) Oui, on peut calculer la fonction trigonométrique de tous les angles.

Appréciation:

5 ou 6 réponses exactes:	Très bien, pour vous la trigonométrie n'est pas une nouveauté. Le paragraphe suivant ne vous causera pas de difficultés.
3 ou 4 réponses exactes:	Bien, vous avez de bonnes connaissances préliminaires qui vous faciliteront l'étude. Vous augmenterez votre savoir en travaillant le prochain paragraphe avec application.
1 ou réponses exactes:	La trigonométrie vous est plutôt étrangère, vous en avez déjà entendu parler sans que votre savoir ne soit bien étayé. La trigonométrie n'est toutefois pas difficile à comprendre. Le prochain chapitre vous la fera connaître.
Aucune réponse exacte:	Vous devrez vous arrêter plus longuement au chapitre suivant. Mais la matière est dosée de telle façon que même un élève sans connaissances préliminaires peut la comprendre. Lisez plusieurs fois ce paragraphe, de bout en bout, et posez-vous des problèmes supplémentaires dans lesquels vous devrez chercher des fonctions trigonométriques dans les quatre quadrants puis en faire la vérification à l'aide du cercle unitaire. Par des exercices répétés vous apprendrez à assimiler ce sujet et à le dominer.

16. Exercices de répétition concernant « I. Les fonctions trigonométriques »

Réponses aux questions a à g (page 84)
a)

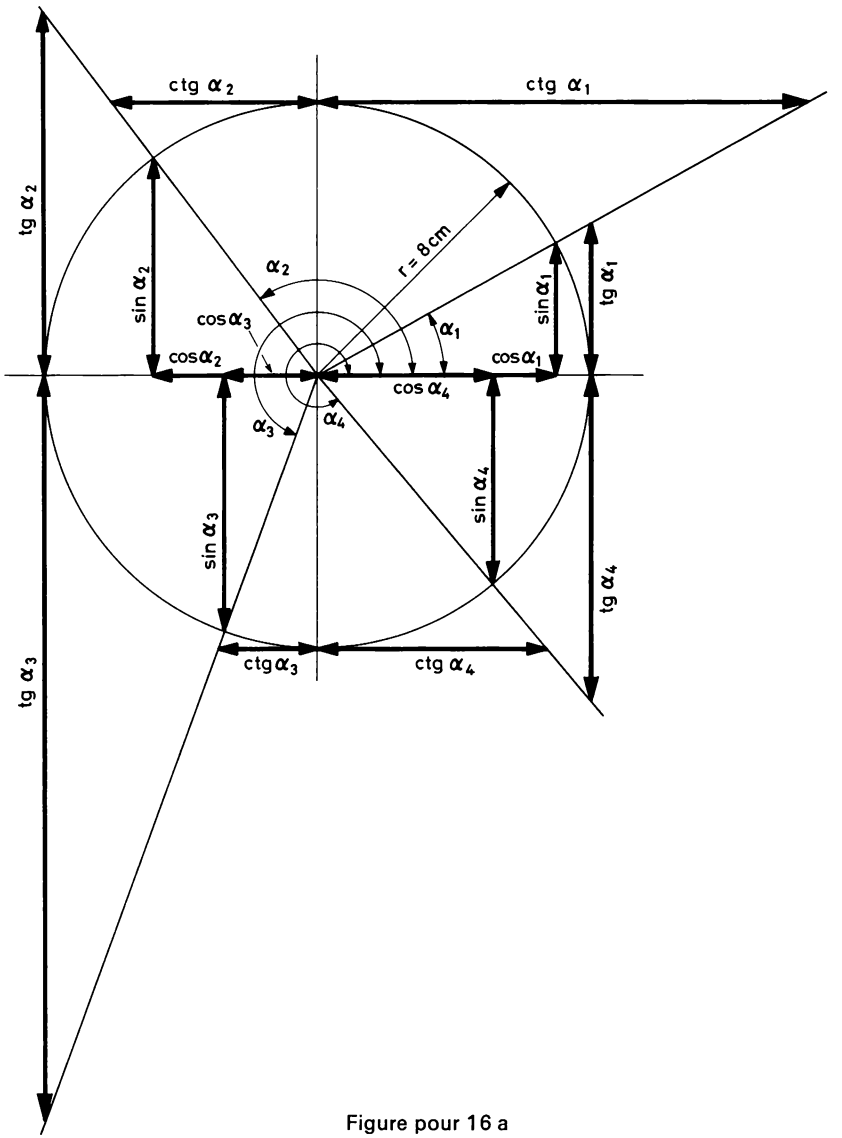


Figure pour 16 a

b)

α	sin α	cos α	tg α	ctg α
α_1 29°	0,4848	0,8746	0,5543	1,804
α_2 127°	0,7986	–0,6018	–1,327	–0,7536
α_3 250°	–0,9397	–0,3420	2,747	0,3640
α_4 310°	–0,7660	0,6428	–1,192	–0,8391

c) **Mesure d'arc** $= \dfrac{\mathbf{2\,\pi}}{\mathbf{360°}} \cdot \alpha\ [°]$

0° = 0,45° = 0,785 ; 90° = 1,571 ; 130° = 2,269 ; 210° = 3,665 ; 345° = 6,021

d) $\alpha_1 = 40°$, $\alpha_2 = 55°$, $\alpha_3 = -30°$, $\alpha_4 = 25°$

e) En électronique, les fonctions trigonométriques sont indispensables car, en courant alternatif, tous les problèmes où un déphasage se produit ne peuvent se résoudre qu'à l'aide de ces fonctions ou, alors, graphiquement.

f) Les valeurs des fonctions d'angles plus grands que 90° peuvent toujours se rapporter à la valeur d'angles compris entre 0° et 90°. La représentation graphique montre que la valeur des fonctions d'angles compris de 0° à 90° se répète périodiquement.

g) *Marche à suivre:*
Chercher la valeur de l'angle pour le cos 0,9 dans la table ou sur la règle à calcul.

Le déphasage est de **25°50′**

Grâce aux exercices de répétition vous pouvez constater si vous avez vraiment compris les bases concernant les fonctions trigonométriques. D'après nos expériences, les angles compris entre 0° et 90° ne présentent pas de difficultés pour l'élève. Toutefois il est vraiment difficile, pour le débutant, de déterminer les valeurs et les signes de fonctions trigonométriques dans les trois autres quadrants. Dans ce cas, l'exercice est une aide précieuse ; celui qui manque d'assurance doit se poser quelques problèmes et les résoudre seul. La vérification s'effectue mieux à l'aide des figures 40 et 41. Dessinez, avec précaution, ces figures sur du papier millimétrique. Collez deux feuilles A4 ensemble pour augmenter la précision de la lecture en dessinant des cercles aussi grands que possible. Les figures vous permettent de vérifier la valeur de la fonction et son signe pour le problème que vous vous êtes posé.
Seul, celui qui maîtrise parfaitement cette matière peut continuer l'étude du paragraphe suivant ; les bases de la trigonométrie sont indispensables pour comprendre la technique des courants alternatifs.

17. Que savez-vous concernant les fonctions trigonométriques sur la règle à calcul?

Réponses aux questions a à e (page 85)

a) sin 25° = **0,423**
b) cos 55° = **0,574**
c) 0,6 = **tg 30,96° ou 30° 58'**
d) ctg 30° = **1,73**
e) sin 3° = **0,0523**

Appréciation:

4 ou 5 réponses exactes:	Très bien, vous connaissez l'emploi de votre règle à calcul. Le paragraphe suivant vous montrera la manière qui vous permettra de mieux utiliser votre règle.
3 réponses exactes:	Vous maîtrisez les principes de base vous permettant l'utilisation de votre règle. Les « finesses » relatives à toutes ses possibilités d'emploi vous sont encore étrangères. Grâce à vos connaissances, il ne vous sera toutefois pas difficile de saisir et d'apprendre toutes les opérations de calcul supplémentaires.
Moins de 3 réponses exactes:	Apparemment, vous n'avez pas encore beaucoup utilisé votre règle. Avant de passer à l'étude du paragraphe suivant il vous serait profitable de lire attentivement le mode d'emploi de votre règle à calcul. Vous constaterez rapidement comme son maniement est simple et tous les avantages que vous pouvez en retirer.

18. Exercices de répétition concernant « II. Les fonctions trigonométriques sur la règle à calcul »

Réponses aux questions a à h (page 92)

a) sin 2,6° = **0,0454**

Marche à suivre:

– écrire la formule pour les petits angles $\sin \alpha \approx \frac{2\pi}{360°} \cdot \alpha\,[°]$

– introduire les valeurs et calculer $\sin \alpha \approx \frac{6{,}28}{360} \cdot 2{,}6$

$\sin \alpha \approx$ **0,0454**

– sur une règle munie de l'échelle des ∢ arcs, la valeur de la fonction se lit directement.

b) cos 11,7° = **0,9792**

Marche à suivre:
Placer le curseur en face de 11,7° sur l'échelle des sinus, lire la valeur de la fonction sur l'échelle de $\sqrt{1 - x^2}$.

c) ctg **86,8°** = **0,0559**

Marche à suivre:

– écrire la formule pour les grands angles $\quad \text{ctg } \alpha \approx \frac{2\pi}{360°} \cdot (90° - \alpha°)$

– introduire les valeurs et calculer $\quad \text{ctg } \alpha \approx \frac{6{,}28}{360°} \cdot 3{,}2$

$\quad \text{ctg} \approx \mathbf{0{,}0559}$

– sur une règle munie de l'échelle des ∢ arcs, la valeur de la fonction se lit directement.

d) tg 67° = **2,356**

Marche à suivre:
Placer le curseur en face de 67° sur l'échelle des cotangentes ou sur 23° de l'échelle des tangentes, lire la valeur de la fonction sur l'échelle 1/x.

e) Au moyen de cette échelle, on peut lire directement pour chaque fonction du sinus la valeur du cosinus et vice versa pour le même angle. La précision de lecture de la règle à calcul étant fortement diminuée à son extrémité droite, il est plus facile – la précision étant meilleure – de lire les fonctions du sinus pour les grands angles et les fonctions du cosinus pour les petits angles sur la partie gauche de la règle.

f) A l'aide de l'échelle ∢ arcs, les fonctions du sin et de la tg pour les angles au-dessous de 6° et celles du cos et de la ctg pour les angles plus grands que 84°, peuvent se lire directement.

g) L'inverse d'une fonction (ou sa valeur réciproque) se lit directement sur l'échelle 1/x. On utilise cette possibilité pour calculer les fonctions des gt d'angles plus grands que 45° et les fonctions des ctg pour les angles plus petits que 45°.

h) Pour calculer la valeur des fonctions de tels angles on se rapporte à la longueur dans le cercle unitaire. Pour ces petits angles, la longueur de l'arc et la fonction trigonométrique sont pratiquement identiques.

$$\mathbf{sin}\ \alpha \approx \frac{\mathbf{2}\,\pi}{\mathbf{360°}} \cdot \alpha\ (°) \quad \text{(pour les angles } < 6°)$$

A l'aide des exercices de répétition vous avez pu vous rendre compte de quelle manière vous maîtrisez les cas spéciaux relatifs aux fonctions trigonométriques au moyen de la règle à calcul. Au cas où vous vous heurtez à des difficultés, lors de la solution des exercices de répétition avec la règle à calcul, cela signifie que vous ne vous êtes pas encore suffisamment entraîné. Dans ce cas, prenez en mains une table des fonctions trigonométriques et choisissez un certain nombre d'angles dont le calcul, avec la règle à calcul, relève de ces cas spéciaux. Cherchez maintenant la valeur de ces fonctions sur la règle et comparez les résultats obtenus avec ceux de la table. Ce n'est qu'en s'exerçant que l'on apprend à utiliser toutes les possibilités de sa règle. Celui qui manie sa règle à calcul à la perfection s'épargne du temps et de la peine car celle-ci trouve facilement place dans la poche de chaque vareuse alors qu'il n'est pas courant d'emporter une table de logarithmes avec soi. Le praticien peut à peine se tirer d'affaire sans règle à calcul ; en revanche, la plupart des professionnels ne connaissent pas toutes les possibilités offertes par cet instrument de calcul. Celui qui maîtrise les cas spéciaux possède un net avantage sur ses semblables.

19. Que savez-vous concernant les courants alternatifs ?

Réponses aux questions a à f (page 93)

a) Un courant alternatif est caractérisé par une variation périodique de son sens et de sa grandeur.
b) Le courant alternatif industriel est sinusoïdal.
c) Une tension alternative de 50 Hz produit 50 oscillations, ou périodes, par seconde.
d) Puisque l'électricité, et par conséquent un signal créé par un courant alternatif, se déplace avec la vitesse de la lumière on calcule combien de fois la longueur d'onde de 30 m est contenue dans la distance parcourue en une seconde par la lumière, soit 300 000 km.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{300\,000\,000 \text{ m/s}}{30 \text{ m}} = 10^7 \text{ Hz} = \mathbf{10 \text{ MHz}}$$

e) Les courants alternatifs se présentent sous les formes principales suivantes :
   - le courant alternatif industriel pour alimenter l'industrie et les ménages en énergie électrique.
   - les courants alternatifs de basse fréquence, sinusoïdaux, utilisés dans la technique des télécommunications ou comme courants porteurs de la parole mais ne se présentant pas sous la forme d'une sinusoïde.
   - les courants de haute fréquence dont les applications sont : les ondes de la radio, les signaux du radar, en médecine et dans l'industrie.

f) Un haut-parleur est alimenté avec des tensions alternatives. Il s'agit ici de signaux devant reproduire la parole et la musique.

Appréciation:

5 ou 6 réponses exactes:	Bien, il est manifeste que vous vous êtes occupé de ce qui a trait aux courants alternatifs. Le paragraphe suivant achèvera de vous familiariser avec les courants et les tensions alternatifs.
3 ou 4 réponses exactes:	Vous semblez connaître les bases élémentaires en ce qui concerne les courants et tensions alternatifs. La nouvelle matière vous initiera plus à fond dans le domaine des grandeurs alternatives.
Moins de 3 réponses exactes:	Les tensions et les courants alternatifs vous sont encore peu familiers. Cela n'est pas un obstacle car le paragraphe suivant contient toutes les données nécessaires concernant ce nouveau sujet. La connaissance des grandeurs alternatives compte parmi l'une des bases les plus importantes de l'électrotechnique. Dans les chapitres suivants, vous serez continuellement confronté avec elles. Par conséquent, il est très important que vous étudiez attentivement le prochain paragraphe.

20. Exercices de répétition concernant « I. Le courant alternatif »

Réponses aux questions a à h (page 105)

a) La pulsation (ou fréquence angulaire) est le produit de la fréquence par le coefficient 2π.

b) Dans l'espace, les ondes électriques se propagent avec la vitesse de la lumière, soit 300 000 km/s.

c) *Marche à suivre:*

- écrire la formule de base $\lambda = \frac{c}{f}$
- extraire f de la formule $f = \frac{c}{\lambda}$
- introduire les valeurs et calculer $f = \frac{300 \cdot 10^6}{41}$; $[f] = \frac{\text{m/s}}{\text{m}} = \text{s}^{-1} = \text{Hz}$

$f = \mathbf{7{,}32\ MHz}$

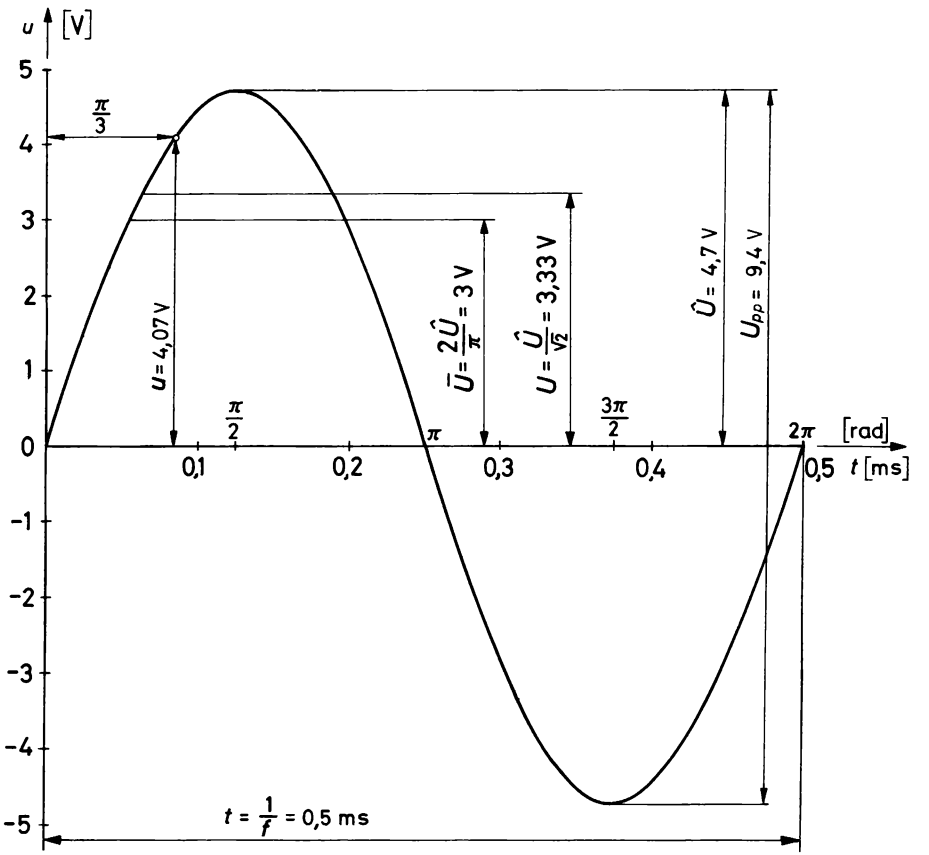


Figure du problème 20 d

e)

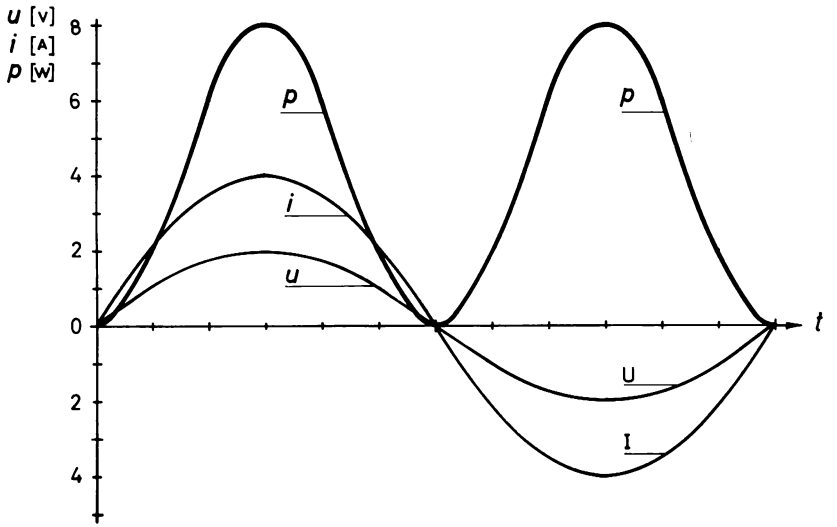


Figure du problème 20 e

Calcul de la puissance moyenne:

Marche à suivre:

– écrire la formule de base $P = U \cdot I$

– formules du calcul avec $\hat{U}$ et $\hat{I}$ $P = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2}$

– introduire les valeurs $P = \frac{2\,\text{V} \cdot 4\,\text{A}}{2} = \mathbf{4\ W}$

f) *Marche à suivre:*
Afin d'obtenir l'onde fondamentale, il faut diviser la fréquence du neuvième harmonique par 9.

$$f_o = \frac{\text{neuvième harmonique}}{9}$$

$$f_o = \frac{2{,}7\ \text{MHz}}{9}$$

$$f_o = \mathbf{300\ kHz}$$

g) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base $f_o = \frac{\text{douzième onde supérieure}}{12 + 1}$

– introduire les valeurs et calculer $f_o = \frac{39\ \text{MHz}}{13}$

$f_o = 3\ \text{MHz}$

– écrire la formule du calcul de la longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f}$

– introduire les valeurs et calculer $\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^6} \frac{\text{ms}^{-1}}{\text{s}^{-1}}$

$\lambda = \mathbf{100\ m}$

h) *Marche à suivre:*

– écrire la formule $u = \hat{U} \cdot \sin(\omega t)$

– introduire les valeurs et calculer $u = 4 \cdot \sin(2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 23 \cdot 10^{-3}$

$u = 4 \cdot \sin(920\pi)\ \text{V}\frac{1}{\text{s}}\text{s}$

$u = \mathbf{0\ V}$

Celui, à qui le calcul apparaît quelque peu abstrait peut en vérifier le résultat par un simple raisonnement. La période de la fréquence est de 50 μs, la valeur momentanée est demandée pour un nombre entier de ms c'est-à-dire que l'oscillation recommence à ce moment-là, puisque 20 périodes sont comprises dans une ms.

Les solutions vous ont montré dans quelle mesure vous avez travaillé ce sujet. D'après nos expériences, l'évaluation de la valeur momentanée crée assez souvent des difficultés. Celles-ci seront surmontées facilement en dessinant 5 périodes complètes d'une tension alternative puis en reportant, sur l'axe des X, le temps et la mesure d'arc. Evaluer la valeur momentanée pour des temps différents. Cette méthode montre clairement la relation entre le processus et la formule de calcul.

Dès que ces relations vous paraîtront tout à fait évidentes, vous pourrez passer au paragraphe suivant.

21. Que savez-vous concernant le courant triphasé?

Réponses aux questions a à e (page 107)

a) Dans le système triphasé, la tension de phase est prélevée entre le conducteur neutre et les conducteurs de phases, alors qu'entre les conducteurs de phases on trouve la tension composée. Dans le système triphasé, la tension composée est toujours plus grande d'un coefficient de $\sqrt{3}$ que la tension de phase: 220 V fois 1,73 donne 380 V.

b) Dans le système triphasé, les générateurs et les utilisateurs peuvent être reliés en étoile ou en triangle. Dans le montage en étoile il se forme un point médian auquel le conducteur neutre est raccordé en plus des trois conducteurs de phases. Dans le montage en triangle il n'y a plus que les trois raccordements de phases.

Le plus souvent, les générateurs fonctionnent avec le montage en étoile tandis que pour les utilisateurs les deux systèmes se présentent.

c) Le conducteur neutre est la liaison qui va au centre de l'étoile d'un générateur. Lorsque les trois phases sont également chargées, aucun courant ne traverse ce conducteur.

d) Le courant polyphasé le plus utilisé présente trois phases.

e) Les générateurs de courant triphasé se construisent plus avantageusement que les générateurs de courant alternatif monophasé. Même le fait que pour trois phases il faille 4 conducteurs est encore un avantage.

Appréciation:

4 ou 5 réponses exactes:	Très bien, vous avez déjà eu à vous occuper du courant triphasé. Toutefois, le paragraphe suivant devrait vous apporter quelques nouveautés car les bases du calcul avec les vecteurs y sont expliquées.
2 ou 3 réponses exactes:	Vous vous êtes déjà occupé du courant triphasé. Le paragraphe suivant va vous permettre de développer votre savoir. Il est certain qu'à la fin de cette leçon, le courant triphasé ne vous causera plus de problèmes.
1 ou aucune réponse exacte:	Il semble que vous n'avez pas encore eu beaucoup l'occasion de vous occuper du courant triphasé. Le prochain paragraphe va vous initier dans ce domaine du courant fort. Si vous avez bien assimilé la leçon concernant le courant alternatif, celle traitant du courant triphasé ne doit pas vous causer de difficultés.

22. Exercices de répétition concernant « II. Courant triphasé »

Réponses aux questions a à h (page 118)

a) La tension composée d'un système triphasé est celle qui apparaît entre deux conducteurs de phases d'un générateur dont le montage est en étoile. Elle se compose de deux tensions déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre.

b) Tension composée

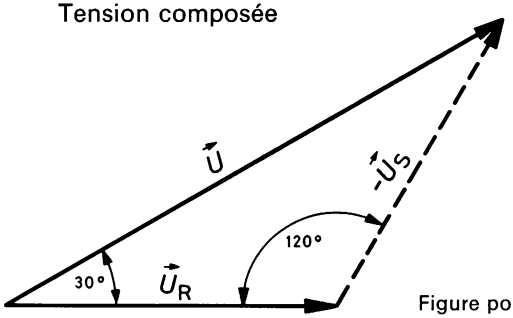


Figure pour la question 22 b

c) Aucun courant ne s'écoule dans le conducteur neutre lorsque les trois phases sont également chargées.

d) Lors du montage en triangle, deux courants s'écoulent dans chaque ligne ; ce sont les courants de charge de chaque phase. Par conséquent, le courant dans la ligne est plus grand que le courant de phase. Les deux courants s'additionnent vectoriellement pour donner le courant de ligne.

e) Schéma Diagramme vectoriel

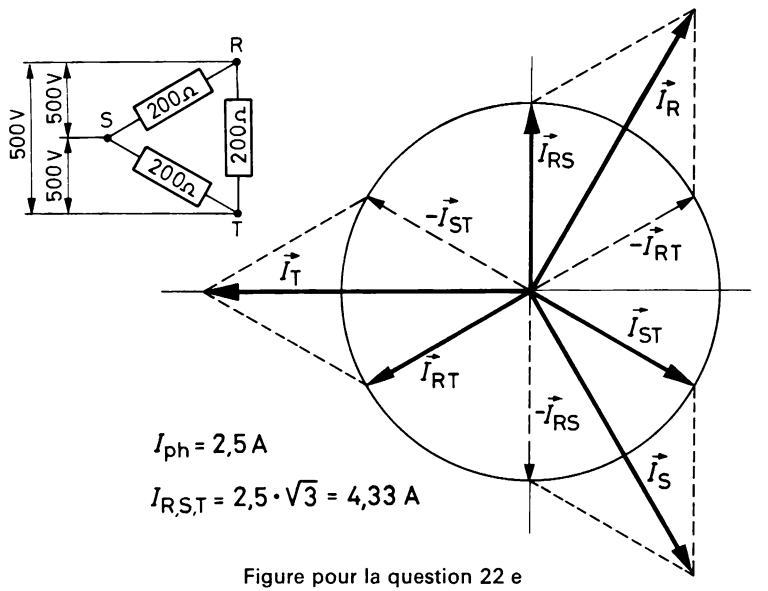


Figure pour la question 22 e

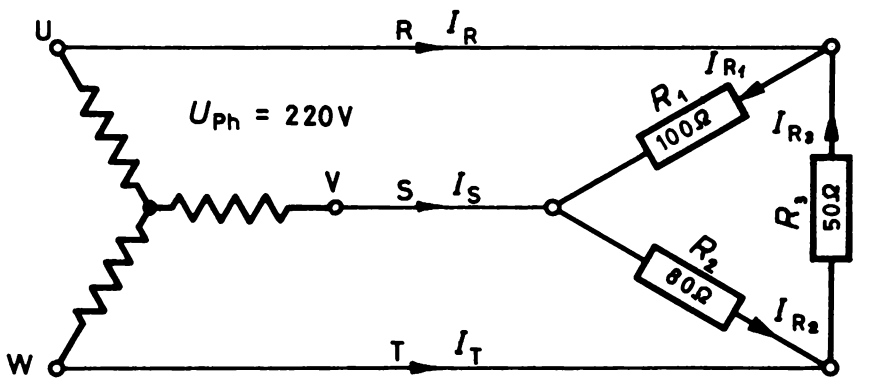


Schéma pour la question 22 f

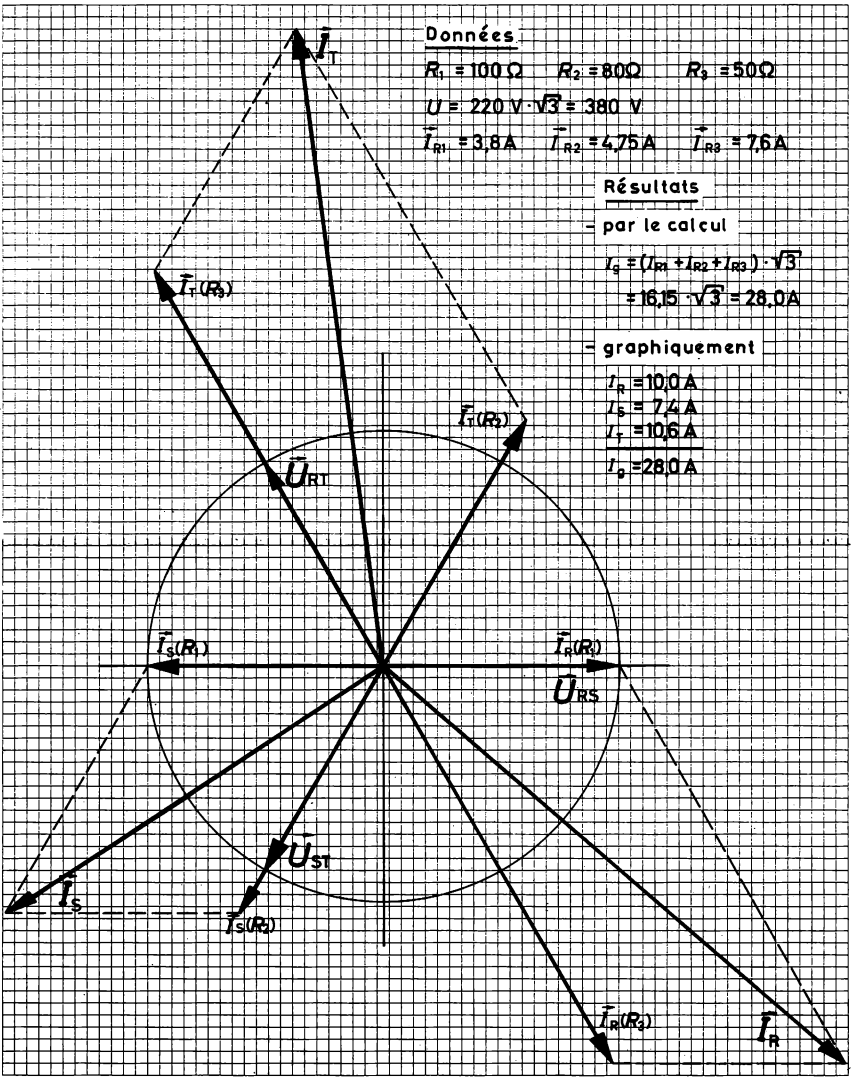


Diagramme vectoriel pour la question 22 f

g)

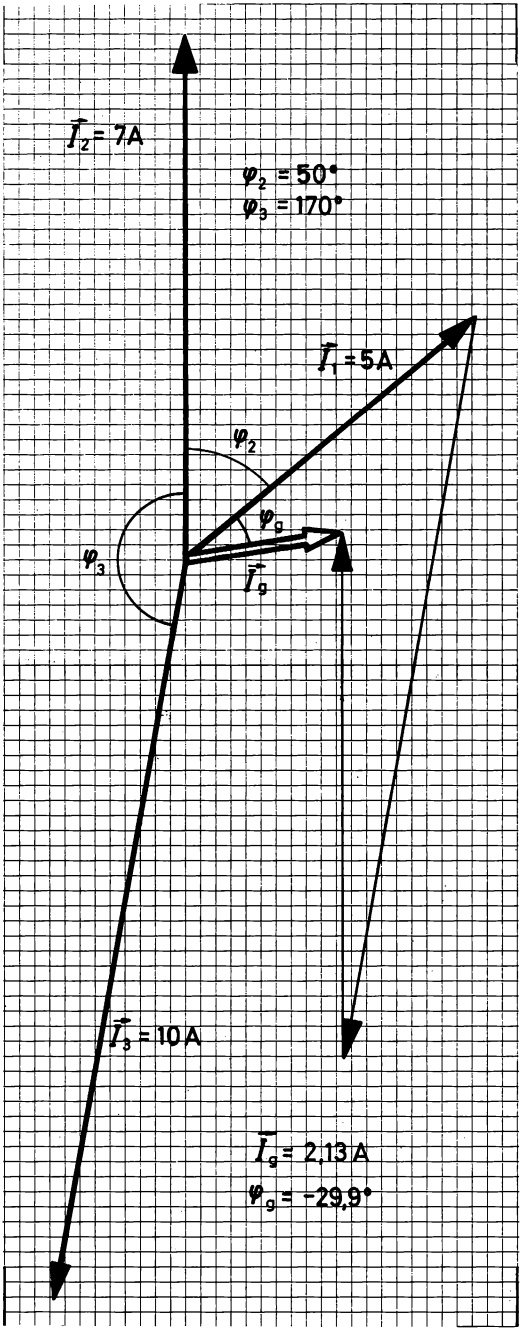


Figure pour la question 22 g

Le courant résultant est de 2,13 A.

Le courant résultant est déphasé de 29,9° par rapport à I_1 (en retard).

h) Un vecteur représente une grandeur qui est caractérisée par une valeur et un sens.

L'accent principal de cette leçon était mis sur la représentation graphique de grandeurs alternatives à l'aide des vecteurs. La théorie du système triphasé est simple en soi. Dès que vous aurez saisi la théorie des vecteurs et que vous pourrez travailler pratiquement avec eux, les réseaux triphasés ne vous causeront plus aucune difficulté. Au cas où vous auriez fait des erreurs lors de la solution des exercices de répétition, vous ne devez pas entreprendre l'étude du paragraphe suivant. Vous devez, avant tout, éliminer toutes les incertitudes. Si, ce qui concerne les vecteurs vous cause encore des difficultés c'est le signe que vous ne vous êtes pas encore suffisamment exercé. Dans ce cas, proposez-vous de résoudre des problèmes selon le modèle de l'exercice f. Choisissez un réseau triphasé et chargez-en inégalement les trois phases, en montage étoile ou triangle. Ensuite, au moyen des diagrammes vectoriels, estimez les courants de lignes et de phases pour le montage triangle puis le courant dans les lignes et dans le conducteur neutre pour le montage en étoile.
La représentation vectorielle est la seule possibilité permettant une vue d'ensemble rapide de systèmes compliqués. Celui qui est à son aise avec la trigonométrie peut essayer de résoudre le problème f mais il constatera rapidement que le temps requis pour les calculs est bien plus important que celui de la solution graphique. Les bases fondamentales du calcul vectoriel font, par conséquent, partie intégrante des connaissances de celui qui doit s'occuper sérieusement d'électronique.

23. Que savez-vous concernant les résistances?

Réponses aux question a à d (page 121)
a) La majorité des petites résistances sont fabriquées avec du charbon.
b) Les résistances bobinées peuvent être, généralement, plus chargées que les résistances à couche.
c) Les potentiomètres sont des résistances munies d'un curseur mobile.
d) La valeur de la résistance se mesure en ohms.

Appréciation:

4 réponses exactes:	Très bien, pour vous les résistances ne sont pas des composants inconnus. Le paragraphe suivant vous offre toutes sortes d'informations les concernant.
2 ou 3 réponses exactes:	Vous connaissez la nature des résistances. Malgré que la résistance soit l'un des plus simples parmi les composants électroniques, elle présente cependant quelques particularités que l'on doit connaître. L'étude du paragraphe qui suit vous familiarisera avec ces particularités.

	Grâce à vos connaissances préalables, il vous sera facile de travailler cette matière.
1 réponse exacte :	Vous savez juste ce qu'il faut connaître de la matière qui vous est exposée. L'étude du paragraphe suivant ne devrait pas vous paraître ardue car les résistances ne présentent pas de problèmes particuliers.
Aucune réponse exacte :	Vous ne devez pas poursuivre la lecture car vous n'avez pas encore compris la loi d'Ohm. Reprenez, avant tout, ce qui est écrit sur ce sujet.

24. Exercices de répétition concernant « I. Résistances »

Réponses aux questions a à n (page 133)

a) On distingue les résistances fixes comme suit : résistances à couche, résistances agglomérées, résistances bobinées.
b) Un potentiomètre est une résistance munie d'un curseur mobile.
c) Un potentiomètre logarithmique présente une courbe de variation logarithmique de sa résistance. La valeur en ohms de chaque partie de sa résistance croît de façon logarithmique par rapport à l'angle de rotation tandis que pour un potentiomètre linéaire la croissance de la résistance est proportionnelle à cet angle.
d) Les potentiomètres linéaires sont souvent employés comme diviseurs variables de tension dans des circuits de mesure. En revanche, on rencontre presque exclusivement les potentiomètres logarithmiques dans les circuits basse fréquence pour régler le volume sonore ou la tonalité.
e) Les potentiomètres trimmers sont utilisés dans les circuits lorsqu'il est nécessaire de pouvoir ajuster un diviseur de tension ou la valeur d'une résistance.
f) Vous pouvez vérifier votre solution en consultant le tableau 9 (page 127).
g) Le tableau 9 (page 127) donne également la réponse à cette question.
h) Les plus utilisées des séries normalisées sont celles dont les tolérances sont de 10% et 5%.
i) Lors de la mise en série de résistances leurs valeurs propres s'additionnent.
k) Lors de la mise en parallèle de résistances, les conductances s'additionnent ; la valeur réciproque de la conductance totale donne alors la résistance composée.
l) La valeur de la résistance d'un conducteur dépend des facteurs suivants :
   – longueur du conducteur ;
   – section du conducteur ;
   – matériau dont le conducteur est constitué ;
   – température du conducteur.
m) La résistance spécifique est celle d'un conducteur constitué d'un matériau déterminé ayant une longueur d'un mètre et une section d'un millimètre carré.

n) *Marche à suivre:*

Première étape: calcul de la résistance à froid des trois bobines

– écrire la formule de base

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$$

– introduire les valeurs relatives aux trois bobines L_1, L_2, L_3 et calculer

$$R_{L1} = \frac{0{,}0177 \cdot 500}{0{,}35^2 \cdot \pi} \quad \frac{\Omega\ \text{mm}^2 \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2}$$

$$R_{L1} = 23\ \Omega$$

$$R_{L2} = \frac{0{,}0286 \cdot 210}{0{,}15^2 \cdot \pi}$$

$$R_{L2} = 85\ \Omega$$

$$R_{L3} = \frac{0{,}096 \cdot 50}{0{,}32^2 \cdot \pi}$$

$$R_{L3} = 17\ \Omega$$

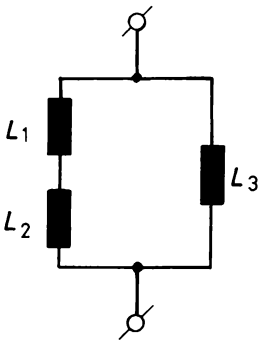


Figure du problème 24 n

Deuxième étape: calcul des résistances des trois bobines pour une température ambiante de 60° C

– écrire la formule

$$R_w = R_{20°} [1 + \alpha_{20} (\vartheta - 20°)]$$

– introduire les valeurs relatives aux trois bobines et calculer

$$R_{wL1} = 23\ (1 + 0{,}00393 \cdot 40)$$

$$R_{wL1} = 26{,}6\ \Omega$$

$$R_{wL2} = 85\ (1 + 0{,}0039 \cdot 40)$$

$$R_{wL2} = 98{,}3\ \Omega$$

$$R_{wL3} = 17\ (1 + 0{,}0055 \cdot 40)$$

$$R_{wL3} = 20{,}7\ \Omega$$

Troisième étape: dessiner le circuit et calculer la résistance composée

– écrire la formule de base

$$R_g = \frac{(R_{wL1} + R_{wL2})\ R_{wL3}}{R_{wL1} + R_{wL2} + R_{wL3}}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$R_g = \frac{(26{,}6 + 98{,}3)\ 20{,}7}{26{,}6 + 98{,}3 + 20{,}7}$$

$$R_g = \mathbf{17{,}75}\ \Omega$$

25. Que savez-vous concernant les condensateurs ?

Réponses aux questions a à f (page 134)

a) Un condensateur est constitué de deux plaques ou de deux revêtements conducteurs qui sont maintenus face à face et séparés par un isolant.
b) L'unité de mesure de la capacité des condensateurs est le farad ou ampèreseconde par volt.
c) Oui, un condensateur bloque le courant continu.
d) Dans un circuit à courant alternatif, le condensateur se comporte comme une résistance.
e) Nous connaissons les condensateurs à plaques, variables, trimmers, à céramique, bobinés avec du papier ou un plastique comme diélectrique isolant, au papier métallisé et électrolytiques.
f) Par le terme d'intensité de champ électrique (ou : gradient de potentiel), on exprime une tension électrique par unité de longueur ce qui équivaut à une chute de tension. Lorsque, entre deux plaques distantes de 2 cm règne une tension électrique de 100 V le gradient de potentiel est de 5000 V par mètre.

Appréciation:

6 ou 5 réponses exactes :	Très bien, le condensateur, ses propriétés et sa construction vous sont déjà familiers. Vos bonnes connaissances préliminaires vous permettront de travailler avec facilité la matière présentée.
4 ou 3 réponses exactes :	Le condensateur n'est plus une nouveauté pour vous. Le paragraphe suivant vous introduira plus en avant dans ce sujet.
2 ou 1 réponses exactes :	Vous avez déjà une certaine idée de la nature d'un condensateur. Le chapitre suivant vous apportera bien du nouveau ; étudiez-le à fond. Le condensateur est l'un des composants les plus importants de l'électrotechnique. Les connaissances concernant son comportement et son fonctionnement sont indispensables pour comprendre les circuits fondamentaux de l'électrotechnique.
Aucune réponse exacte :	Le condensateur vous fait découvrir un composant de l'électrotechnique dont vous ne savez pas encore grand chose. Cette constatation ne doit pas vous décourager. La matière est structurée de manière à ce que l'on puisse la comprendre et l'assimiler sans connaissances préliminaires. Jusqu'à présent, vous avez correctement compris bien des principes du domaine de l'électrotechnique. L'étude du condensateur vous fera franchir un grand pas en avant puisqu'il s'agit de l'un des composants les plus importants de la technique moderne.

26. Exercices de répétition concernant « II. Condensateurs »

Réponses aux questions a à n (page 171)

a) La charge électrique Q est identique à la quantité d'électricité. La charge s'obtient en multipliant le courant par le temps. Par conséquent, l'unité de mesure est l'ampèreseconde.

b) La capacité d'un condensateur est déterminée par les facteurs suivants :
- superficie des plaques ;
- distance entre les plaques ;
- constante diélectrique du matériau isolant (diélectrique).

c) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base donnant la capacité $C = \dfrac{A \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r}{d}$

– extraire A de la formule $A = \dfrac{C \cdot d}{\varepsilon_o \cdot \varepsilon_r}$

– introduire les valeurs et calculer $A = \dfrac{75 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{0{,}8855 \cdot 10^{-11}} \dfrac{F \cdot m \cdot m}{F}$

$A = \mathbf{8{,}47 \cdot 10^{-4}\ m^2}$

$A = 8{,}47\ cm^2$

d) La constante diélectrique du vide est une constante naturelle. Elle est utilisée lors de la conversion dans le système Giorgi.

e) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base de la charge $Q = C \cdot U$

– extraire C de la formule $C = \dfrac{Q}{U}$

– introduire les valeurs et calculer $C = \dfrac{0{,}24 \cdot 10^{-3}}{120} \dfrac{AS}{V}$

$C = \mathbf{2\ \mu F}$

f) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base de la capacité $C = \dfrac{A \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r}{d}$

– extraire d de la formule $d = \dfrac{A \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r}{C}$

– introduire les valeurs et calculer $d = \dfrac{10^{-2} \cdot 0{,}8855 \cdot 10^{-11} \cdot 1}{100 \cdot 10^{-12}} \dfrac{m^2F}{mF}$

$d = 8{,}855 \cdot 10^{-4}\ m$

– écrire la formule de base exprimant la tension $U = \frac{Q}{C}$

– introduire les valeurs et calculer $U = \frac{4 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot 10^{-10}} \frac{\text{As V}}{\text{As}}$

$U = 40 \text{ V}$

– écrire la formule de base exprimant le gradient de potentiel $E = \frac{U}{d}$

– introduire les valeurs et calculer $E = \frac{40}{8{,}855 \cdot 10^{-4}} \frac{\text{V}}{\text{m}}$

$E = \mathbf{45172\ V/m}$

g) La constante de temps d'un circuit *RC* est le produit de la résistance multipliée par la capacité. Elle indique le temps qui s'écoule jusqu'à ce que la tension, aux bornes du condensateur, atteigne le 63% de la tension de charge.

h) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base exprimant la constante de temps $\tau = C \cdot R$

– extraire *C* de la formule $C = \frac{\tau}{R}$

– introduire les valeurs et calculer $C = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{330 \cdot 10^{3}} \frac{\text{As}}{\text{V}}$

$C = \mathbf{0{,}1515\ \mu F}$

i) *Marche à suivre:*

– dessiner le schéma

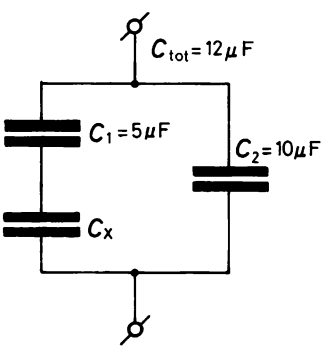


Figure pour la question 26 i

Première étape : calcul des condensateurs branchés en série C_s

– écrire la formule $C_s = C_{tot} - C_2$

– introduire les valeurs $C_s = 12 - 10 = 2\ \mu F$

Deuxième étape : calcul de la capacité inconnue

– écrire la formule des condensateurs en série $C_s = \dfrac{C_x \cdot C_1}{C_x + C_1}$

– extraire C_x de la formule $C_x = \dfrac{C_s \cdot C_1}{C_1 - C_s}$

– introduire les valeurs et calculer $C_x = \dfrac{2 \cdot 5}{5 - 2}$

$C_x = \mathbf{3{,}33\ \mu F}$

k) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base $U = \dfrac{Q}{C}$

– en tirer la conclusion :
Lorsque la charge est constante et que la capacité est diminuée de moitié, la tension doit s'élever au double de la valeur primitive aux bornes du condensateur.

La tension s'élève à 200 V.

l) *Marche à suivre:*

– dessiner le schéma

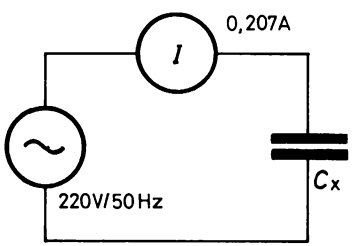


Figure pour la question 26 l

– écrire la formule de base de la réactance capacitive (capacitance) $X_c = \dfrac{1}{\omega C}$

– extraire C de la formule $C = \dfrac{1}{\omega X_c}$

– écrire la formule exprimant X_c $\quad X_c = \dfrac{U}{I}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad X_c = \dfrac{220}{0{,}207}$

$X_c = \mathbf{1063}\ \Omega$

– introduire la valeur de la réactance capacitive dans la formule de C et calculer $\quad C = \dfrac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 1063}$

$C = \mathbf{3}\ \mu\mathbf{F}$

m) Le condensateur au papier métallisé se « guérit » de lui-même. Un passage de la tension (à travers le diélectrique) ne le détruit pas, l'endroit perforé se régénère de lui-même. Pour les mêmes caractéristiques électriques ses dimensions sont plus petites.

n) Les condensateurs électrolytiques ne peuvent être reliés qu'à une tension continue. Ici, il faut prendre garde à la polarité de la tension et à son ondulation.

Les exercices vous ont montré de quelle façon vous êtes au courant en ce qui concerne les condensateurs. Vous avez appris à connaître un composant qui joue un rôle décisif dans tous les domaines de la technique. Les connaissances concernant la construction et le comportement des capacités font partie du bagage technique élémentaire du spécialiste. Ne vous occupez, en aucun cas, du chapitre suivant si vous avez eu de la peine à résoudre les exercices de répétition. Travaillez ce sujet jusqu'à ce que tout ce qui y est afférent vous soit clair. Si, maintenant, vous vous contentez d'un savoir fragmentaire vous manquerez, plus tard, la jonction avec le sujet suivant.

27. Que savez-vous concernant les bobines ?

Réponses aux questions a à g (page 172)

a) Dans le cas le plus simple, une bobine se compose d'un enroulement soutenu par ses extrémités (bobine « sur l'air ») mais le plus souvent, l'enroulement est supporté par un corps de bobine. Les bobines haute fréquence possèdent souvent un noyau de ferrite tandis que celles pour la basse fréquence ont un noyau de fer feuilleté.

b) L'inductance des bobines se mesure en henrys ($H = Vs\ A^{-1}$).

c) Dans un circuit à courant continu, si l'on excepte le moment de l'enclenchement, seule la résistance ohmique de l'enroulement entre en ligne de compte.

d) Dans un circuit à courant alternatif, la bobine se comporte comme une résistance dont la valeur croît proportionnellement avec la fréquence et l'inductance.

e) Nous effectuons une distinction entre les bobines « sur l'air » et celles – les plus nombreuses – qui ont un noyau ferromagnétique. Les bobines « sur l'air » sont très souvent utilisées dans les circuits haute fréquence en tant qu'élément oscillant ou comme bobine de choc, d'arrêt, etc.
Les bobines munies d'un noyau ferromagnétique se rencontrent aussi bien en technique de haute que de basse fréquence : pour la première, les noyaux sont en ferrite jusqu'à la gamme des fréquences sonores (ferrites de diverses qualités) ; dans le second cas on utilise du fer feuilleté — en basse fréquence – ou pour les circuits de filtrage.
Les variomètres sont des bobines dont l'inductance est réglable de façon continue.

f) Le noyau de fer augmente l'inductance de la bobine.

g) Un champ magnétique est la zone d'influence due aux lignes de force magnétiques.

Appréciation:

7 ou 6 réponses exactes :	Très bien. Vous en savez déjà pas mal en ce qui concerne l'inductance. Ce qui va suivre ne doit pas vous créer de difficultés.
5 ou 4 réponses exactes :	Vous avez déjà de bonnes connaissances préliminaires. Le contenu du paragraphe suivant vous aidera à perfectionner vos connaissances.
3 réponses exactes :	Vous possédez certaines connaissances de base. Etudiez pas à pas, avec attention, le paragraphe suivant. Conjointement avec le condensateur, la bobine est l'un des composants les plus importants de la technique moderne des télécommunications et de l'électronique. Des connaissances solides concernant la construction et le comportement des bobines sont indispensables pour comprendre la technique des circuits.
2 à 0 réponses exactes :	Vous auriez pu répondre exactement aux questions a, f et g si vous aviez bien travaillé le chapitre concernant le magnétisme. Le comportement d'une bobine, dans un circuit à courant continu ou alternatif ne peut être compris qu'en s'appuyant sur les lois fondamentales du magnétisme. Reprenez l'étude de la documentation adéquate avant de passer outre.

28. Exercices de répétition concernant « III. Bobines »

Réponses aux questions a à e (page 196)

a) *Marche à suivre:*

– écrire la formule donnant l'inductance des bobines « sur l'air »

$$L = \frac{\mu_o \cdot \pi \cdot r^2 \cdot N^2}{l}$$

– extraire N^2 de la formule $N^2 = \dfrac{L \cdot I}{\mu_o \cdot \pi \cdot r^2}$

– extraire la racine carrée $N = \sqrt{\dfrac{L \cdot I}{\mu_o \cdot \pi \cdot r^2}}$

– introduire les valeurs et calculer $N = \sqrt{\dfrac{0{,}6 \cdot 0{,}12}{1{,}256 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}14 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}}$

$$[N] = \frac{\text{Vs} \cdot \text{m} \cdot \text{A m}}{\text{A} \cdot \text{Vs} \cdot \text{m}^2} = 1$$

N = **6754 spires**

b) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base exprimant la tension induite $U = \dfrac{\Delta I}{\Delta t} \cdot L$

– extraire L de la formule $L = \dfrac{U}{\dfrac{\Delta I}{\Delta t}} = \dfrac{U \cdot \Delta t}{\Delta I}$

– introduire les valeurs et calculer $L = \dfrac{50 \cdot 0{,}7}{5}$

$$[L] = \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = \text{H}$$

L = **7 H**

c) *Marche à suivre:*

– dessiner le schéma

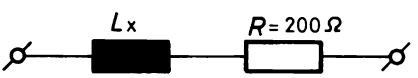


Figure pour la question 28 c

– écrire la formule de base exprimant la constante de temps $\tau = \dfrac{L}{R}$

– extraire L de la formule $L = \tau \cdot R$

– introduire les valeurs et calculer $L = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}2 \cdot 10^3 \text{ s} \cdot \dfrac{V}{A}$

L = **1,6 H**

d) *Marche à suivre:*
– dessiner le schéma

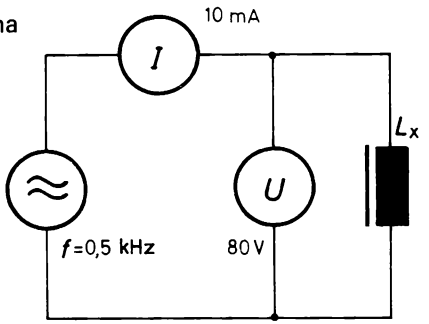


Figure pour la question 28 d

Première étape : calcul de l'inductance

– écrire la formule de base $X_L = \frac{U}{I}$

– introduire les valeurs et calculer $X_L = \frac{80}{10 \cdot 10^{-3}} \frac{V}{A}$

$X_L = 8\ k\Omega$

Deuxième étape : déterminer l'inductance

– écrire la formule de base $X_L = \omega \cdot L$

– extraire L de la formule $L = \frac{X_L}{\omega}$

– introduire les valeurs et calculer $L = \frac{8 \cdot 10}{6{,}28 \cdot 500} \frac{V}{A} \cdot s$

$L = \mathbf{2{,}546\ H}$

e) *Marche à suivre:*
Première étape : calcul de l'inductance de la bobine L_1

– écrire la formule $X_{L1} = \omega \cdot L_1$

– introduire les valeurs et calculer $X_L = 6{,}28 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 1{,}5 \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A}$

$X_L = 18{,}84\ k\Omega$

Deuxième étape : calcul de I_2

– écrire la formule de base $I_2 = \frac{U}{X_{L1}}$

– introduire les valeurs et calculer $I_2 = \frac{20}{18{,}84 \cdot 10^3}$

$I_2 = \mathbf{1{,}062\ mA}$

Troisième étape : calcul de I_3

– écrire la formule de base $I_3 = I_1 - I_2$

– introduire les valeurs et calculer $I_3 = 4 \cdot 10^{-3} - 1{,}062 \cdot 10^{-3}$

$I_3 = \mathbf{2{,}938\ mA}$

Quatrième étape : calcul de X_{L_2}

– écrire la formule de base $X_{L_2} = \dfrac{U}{I_3}$

– introduire les valeurs et calculer $X_{L_2} = \dfrac{20}{2{,}938 \cdot 10^{-3}}$

$X_{L_2} = \mathbf{6{,}81\ k\Omega}$

Cinquième étape : calcul de L_2

– écrire la formule de base $X_{L_2} = \omega \cdot L_2$

– extraire L_2 de la formule $L_2 = \dfrac{X_{L_2}}{\omega}$

– introduire les valeurs et calculer $L_2 = \dfrac{6{,}81 \cdot 10^3}{6{,}28 \cdot 2 \cdot 10^3} \dfrac{\text{Vs}}{\text{A}}$

$L_2 = \mathbf{0{,}542\ H}$

Avez-vous résolu les problèmes sans erreur ? Si tout s'est bien passé, vous avez alors en mains l'outil qui vous permettra d'entreprendre – avec d'excellentes connaissances – l'étude du sujet suivant. Nous nous occuperons, dans le cadre du chapitre suivant, de la mise en série et en parallèle de réactances et de résistances.

29. Que savez-vous au sujet des circuits composés de réactances et de résistances ?

Réponses aux questions a à h (page 197)

a) La résistance en courant alternatif, d'un condensateur sans perte, est désignée par « réactance capacitive ou capacitance ».
b) La résistance en courant alternatif, d'une inductance sans perte, est désignée par « résistance inductive ou inductance ».
c) Dans le condensateur, le courant avance de 90° par rapport à la tension.
d) Dans la bobine, le courant retarde de 90° par rapport à la tension.
e) Non, des réactances et des résistances ohmiques, reliées en un circuit série, doivent être additionnées géométriquement.
f) La résistance en courant alternatif d'un circuit, composée de réactances et de résistances s'appelle « l'impédance ».
g) La puissance réactive résulte du produit de la tension par le courant qui sont mesurés aux bornes d'une réactance. La puissance réactive ne fournit aucun travail et n'utilise aucune énergie.
h) Le facteur de puissance cos φ permet de calculer la puissance active d'une impédance. La puissance active résulte du produit de la puissance apparente par le facteur de puissance. Par le terme de puissance apparente, on entend celle qui semble être prélevée, c'est-à-dire le produit du courant par la tension.

Appréciation:

8 à 7 réponses exactes :	Très bien. Vous vous êtes déjà occupé des problèmes concernant les circuits à courant alternatif. Lors de l'étude du paragraphe suivant, concentrez-vous principalement sur la représentation dans le champ des vecteurs et résolvez quelques exercices pour vous entraîner à ce genre de représentation.
6 réponses exactes :	Vous vous êtes déjà occupé des circuits complexes du courant alternatif. Cette préparation vous sera utile pour l'étude des matières qui suivent. Considérez toutefois qu'il s'agit ici de problèmes fondamentaux. Vous les rencontrerez toujours, sous une forme ou une autre. Vous devez vous faire une idée tout à fait claire de ce qui concerne les processus dans les circuits à courant alternatif. Eliminez les incertitudes en reprenant plusieurs fois et consciencieusement l'étude de ce sujet. Vous acquérez maintenant les connaissances de base pour comprendre la technique des courants alternatifs.
5 à 0 réponses exactes :	Il vous manque les bases fondamentales, coordonnées, pour l'étude du paragraphe suivant.

Vous deviez pouvoir répondre aux questions a, b, c, d et g car ces problèmes ont déjà été traités dans les paragraphes précédents. Vous deviez pouvoir répondre à la question e en vous basant sur un raisonnement logique. Il est inutile de continuer l'étude si les bases élémentaires manquent. Assimilez premièrement les connaissances qui vous manquent en retravaillant à nouveau la matière déjà enseignée.

30. Exercices de répétition concernant « IV. Circuit série composé de résistances et de réactances

Réponses aux questions a à h (page 223)

a) Le facteur de puissance cos φ permet de calculer la puissance active d'une impédance lorsque sa puissance apparente est connue. La puissance active est le résultat du produit de la puissance apparente par le facteur de puissance cos φ.

b) Le sinus de l'angle de déphasage φ est connu sous le nom de facteur de puissance réactive. Il permet de calculer la puissance réactive d'une impédance lorsque sa puissance apparente est connue. La puissance réactive est le résultat du produit de la puissance apparente par le facteur de puissance réactive, sin φ.

c) *Puissance apparente*
La puissance apparente d'une impédance est celle qui semble être prélevée par cette impédance. C'est le produit du courant par la tension. L'unité de mesure est (S) = VA = volt · ampère.
Puissance active
La puissance active est celle qui est utilisée par les résistances actives dans l'impédance. C'est le résultat du produit de la puissance apparente par le facteur de puissance cos φ. L'unité de mesure [P] = le watt.
Puissance réactive
La puissance réactive est celle qui semble être prélevée par les résistances réactives (réactance). Par suite du déphasage, dans les résistances réactives, cette puissance n'est toutefois pas utilisée : elle ne fournit aucun travail. Elle est le produit de la puissance apparente multipliée par le facteur de puissance réactive, sin φ. L'unité de mesure [P_q] = le var = le volt · ampère réactif.

d) Le facteur de qualité Q_L est une mesure de la qualité des bobines. Le coefficient de qualité est un nombre sans dimension, il exprime le rapport entre la réactance et la résistance de pertes série, il s'ensuit que sa valeur est dépendante de la fréquence.

e) Les pertes dans les condensateurs sont définies par le facteur de pertes tg δ. Il correspond à la tangente de l'angle de pertes δ ; celui-ci est l'angle complémentaire de l'angle de déphasage φ.

f) *Marche à suivre:*
– dessiner le schéma équivalent

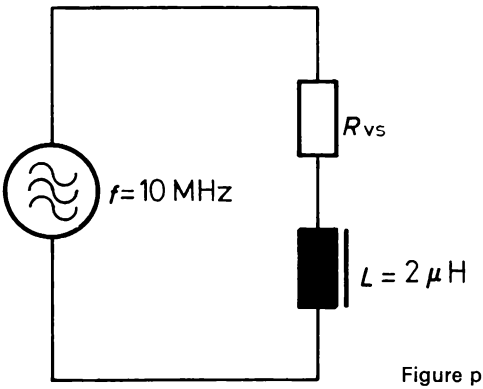


Figure pour la question 30 f

– écrire la formule de base qui exprime Q_L $\quad Q_L = \dfrac{X_L}{R_{vs}}$

– extraire R_{vs} de la formule $\quad R_{vs} = \dfrac{X_L}{Q_L}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad R_{vs} = \dfrac{2\pi \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{80}$

$$[R_{vs}] = \frac{Vs}{As} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$R_{vs} = \mathbf{1{,}57}\ \Omega$$

g) *Marche à suivre:*
– dessiner le schéma équivalent

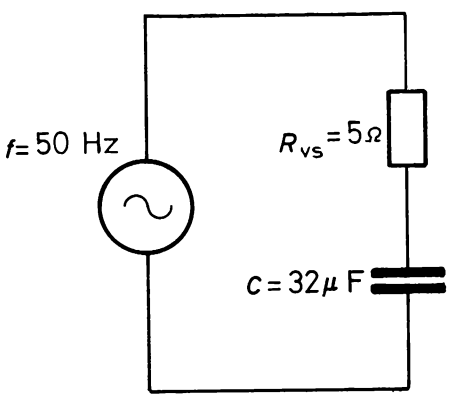


Figure pour la question 30 g

– écrire la formule de base qui exprime tg δ

$$\text{tg } \delta = \omega \cdot C \cdot R$$

– introduire les valeurs et calculer

$$\text{tg } \delta = 2\pi \cdot 50 \cdot 32 \cdot 10^{-6} \cdot 5$$

$$[\text{tg}\delta] = \frac{1}{\text{s}} \cdot \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1$$

$$\text{tg } \delta = \mathbf{5{,}03 \cdot 10^{-2}}$$

h) *Marche à suivre:*

– Première étape: calcul de la réactance

– écrire la formule de base qui exprime la réactance

$$X_\text{L} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$X_\text{L} = \omega \cdot L$$

– introduire les valeurs et calculer

$$X_\text{C} = \frac{1}{2\pi \cdot 0{,}6 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-10}}$$

$$[X_\text{C}] = \frac{\text{s} \cdot \text{V}}{\text{As}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$$

$$X_\text{C} = 663\ \Omega$$

$$X_\text{L} = 2\pi \cdot 0{,}6 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-3}$$

$$[X_\text{L}] = \frac{1}{\text{s}} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$$

$$X_\text{L} = 377\ \Omega$$

Deuxième étape: calcul de l'impédance

– écrire la formule de base qui exprime l'impédance

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$Z = \sqrt{150^2 + (377 - 663)^2}$$

$$Z = 323\ \Omega$$

Troisième étape: calcul des facteurs de puissance

– écrire la formule de base exprimant le cos φ

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$\cos \varphi = \frac{150}{323}$$

$$\cos \varphi = \mathbf{0{,}464}$$

– écrire la formule de base qui exprime sin φ

$$\sin \varphi = \frac{X_C - X_L}{Z}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$\sin \varphi = \frac{663 - 377}{323}$$

$$\sin \varphi = \mathbf{0{,}885}$$

– chercher le déphasage dans la table

$$\varphi = \mathbf{-62°}$$

Quatrième étape : calcul des puissances

– écrire la formule de base qui exprime les puissances

$$S = \frac{U^2}{Z}$$

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$P_q = S \cdot \sin \varphi$$

– introduire les valeurs et calculer

$$S = \frac{220^2}{323} [S] = \frac{V^2\,A}{V} = VA$$

$$S = \mathbf{149{,}8\ VA}$$

$$P = 149{,}8 \cdot 0{,}464$$

$$P = \mathbf{69{,}5\ W}$$

$$P_q = 149{,}8 \cdot 0{,}885$$

$$P_q = \mathbf{132{,}6\ vars}$$

Cinquième étape : vérification des résultats en calculant la puissance à l'aide du courant

– écrire la formule de base qui exprime I

$$I = \frac{U}{Z}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$I = \frac{220\ V}{323\ \Omega}$$

$$I = 0{,}681\ A$$

$$I^2 = 0{,}464\ A^2$$

– écrire les formules qui expriment les puissances

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P_q = I^2 \cdot (X_C - X_L)$$

– introduire les valeurs et calculer

$$P = 0{,}464 \cdot 150 \frac{A^2\,V}{A}$$

$$P = 69{,}5\ W$$

$$P_q = 0{,}464 \cdot 286$$

$$P_q = 132{,}6\ vars$$

– Sixième étape : dessiner le diagramme des vecteurs

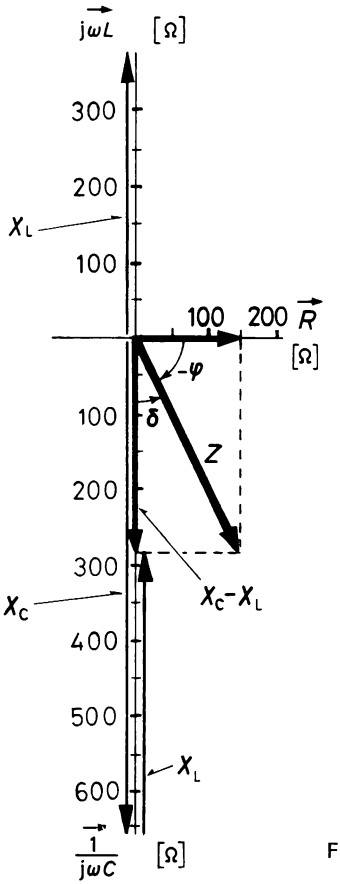


Figure pour la question 30 h

31. Que savez-vous concernant la mise en parallèle de résistances et de réactances ?

Réponses aux questions a à f (page 224)

a) Le cos φ a la même signification pour un circuit série que pour un circuit parallèle. Cependant, une distinction doit être faite lors de son calcul :

Circuit série : $\cos \varphi = \dfrac{\text{Résistance effective série}}{\text{Impédance}}$

Circuit parallèle : $\cos \varphi = \dfrac{\text{Impédance}}{\text{Résistance effective parallèle}}$

b) Le calcul des circuits série se base soit sur les tensions aux bornes des divers composants, soit sur les valeurs des résistances de ces composants. L'estimation du circuit en parallèle s'effectue, au contraire, par les courants qui s'écoulent à travers les diverses résistances ou par les valeurs de la conductance de ces résistances.

c) La conductance est la valeur réciproque (ou inverse) de la résistance. Son unité de mesure est le « siemens ».

d) Pour calculer la puissance réactive de ce circuit on doit connaître le facteur de puissance réactive sin φ et la puissance apparente ou la tension aux bornes du circuit et le courant réactif.

e) Oui, le facteur de qualité d'une bobine correspond à la tg de l'angle de déphasage φ. La qualité d'une bobine peut donc être définie tant pour un amortissement série que parallèle.

f) Le sens de la conductance et de la résistance est le même pour les résistances ohmiques (résistances pures), même si leurs longueurs sont inégales, car l'une est la réciproque de l'autre.
Le sens de la conductance de réactances pures est l'inverse de celui de la réactance propre (la flèche est tournée de 180°). Dans ce cas également, les longueurs de la réactance et de la conductance – qui sont réciproques – sont inégales. Puisque les impédances se joignent vectoriellement, comme les conductances résultantes, ces dernières et leurs impédances correspondantes indiquent des sens différents.

Appréciation:

6 à 5 réponses exactes :	Très bien, vous disposez de bonnes connaissances préliminaires. Au cas où vous auriez répondu exactement par un raisonnement logique vous pouvez vous en réjouir car vous avez appris à passer de ce qui était connu à ce qui est inconnu et en faire la combinaison exacte.
Moins de 4 réponses exactes :	Les questions b et f exigeaient des connaissances plus étendues ou une plus grande capacité de raisonner logiquement. Vous deviez pouvoir répondre aux autres questions grâce au savoir déjà acquis. C'est le cas des questions a et c qui ont déjà été traitées. Vous pouviez trouver la réponse aux questions d et e si vous pouvez raisonner logiquement et si vous avez déjà assimilé les connaissances exactes. Examinez vos erreurs et remettez en travail la matière qui vous a causé des difficultés avant d'entreprendre l'étude du chapitre suivant.

32. Exercices de répétition concernant « V. La mise en parallèle de résistances et de réactances »

Réponses aux questions a à g (page 241)

a) Le sens du vecteur de la susceptance (conductance inductive) est déterminé par celui du courant correspondant.

b) Voir l'exercice a des questions d'introduction (page 461).

c) La conductance inductive est la valeur réciproque de la réactance inductive.

d) La conductance capacitive est la valeur réciproque de la réactance capacitive.

e) *Marche à suivre:*

– dessiner le schéma

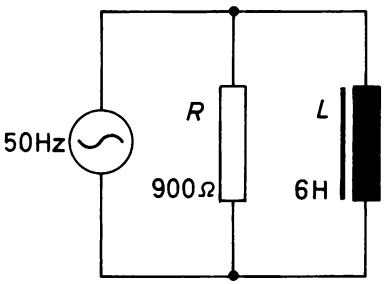


Figure pour la question 32 e

Première étape : calcul des conductances

– écrire la formule de base

$$G = \frac{1}{R}$$

$$B_L = \frac{1}{\omega \cdot L}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$G = \frac{1}{900}$$

$$G = 1{,}11 \text{ mS}$$

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 6}$$

$$B_L = 0{,}531 \text{ mS}$$

Deuxième étape : dessiner le diagramme vectoriel

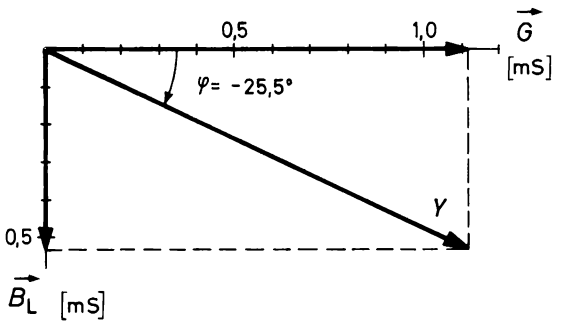


Diagramme pour la question 32 e

Troisième étape : calcul de l'impédance

– écrire la formule de base

$$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{G^2 + B_L^2}}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$Z = \frac{1}{\sqrt{1{,}11^2 \cdot 10^{-6} + 0{,}531 \cdot 10^{-6}}}$$

$$Z = \mathbf{812}\ \Omega$$

Quatrième étape : calcul du facteur de puissance cos φ

– écrire la formule de base

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}$$

– introduire les valeurs et calculer

$$\cos \varphi = \frac{812}{900}$$

$$\cos \varphi = \mathbf{0{,}902}$$

Cinquième étape : grouper les résultats et en faire la vérification au moyen du diagramme vectoriel

$$Z = \mathbf{812}\ \Omega \qquad \cos \varphi = \mathbf{0{,}902}$$

Le diagramme vectoriel indique un angle de déphasage de 25,5°, sa résolution à l'aide de la règle à calcul donne pour le cosinus de 25,5° : 0,902. Ainsi la représentation graphique a confirmé la solution obtenue par le calcul.

f) *Marche à suivre:*

– dessiner le schéma

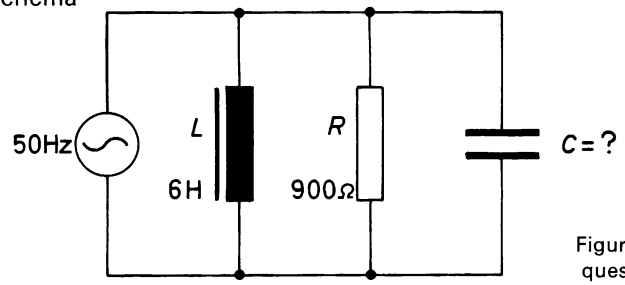


Figure pour la question 32 f

Première étape: énoncer la condition pour résoudre le problème

– Condition: pour compenser l'influence de l'impédance, la capacitance doit présenter la même valeur

– écrire l'équation de cette condition $X_C = X_L$ d'où $B_C = B_L$

– introduire la valeur de *Bc* dans l'équation $\omega C = 0{,}531 \cdot 10^{-3}$ S

– extraire *C* $$C = \frac{0{,}531 \cdot 10^{-3}}{\omega}$$

– introduire les valeurs et calculer $$C = \frac{0{,}531 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 50}$$

$$C = \mathbf{1{,}69\ \mu F}$$

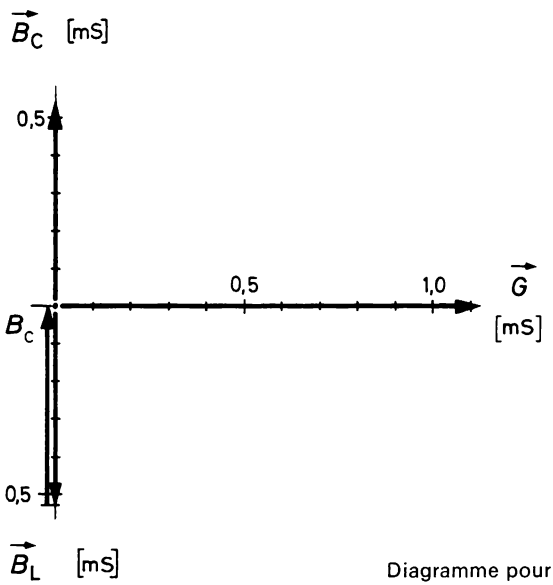


Diagramme pour la question 32 f

g) *Marche à suivre:*
Première étape: calcul des conductances

– écrire les formules de base $G = \frac{1}{R}$

– introduire les valeurs et calculer

$$G = \frac{1}{30}$$

$$G = 33{,}3 \text{ mS}$$

$$B_L = \frac{1}{\omega L} \quad [B_L] = \frac{sA}{Vs} = S$$

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 0{,}6 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}$$

$$B_L = 10{,}61 \text{ mS}$$

$$B_C = \omega C \quad [B_C] = \frac{As}{V \cdot s} = S$$

$$B_C = 2\pi \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-5}$$

$$B_C = 37{,}7 \text{ mS}$$

Deuxième étape: calcul de l'impédance

– écrire la formule de base $|Z| = \frac{1}{\sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2}}$

– introduire les valeurs et calculer

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{33{,}3^2 \cdot 10^{-6} + (37{,}7 \cdot 10^{-3} - 10{,}61 \cdot 10^{-3})^2}}$$

$$|Z| = \mathbf{23{,}3}\ \Omega$$

Troisième étape: calcul du facteur de puissance et du facteur de puissance réactive

– écrire les formules de base $\cos \varphi = \frac{Z}{R}$

– introduire les valeurs et calculer

$$\cos \varphi = \frac{23{,}3}{30}$$

$$\cos \varphi = \mathbf{0{,}777}$$

$$\sin \varphi = Z \cdot (B_C - B_L)$$

$$\sin \varphi = 23{,}3 \cdot (37{,}7 \cdot 10^{-3} - 10{,}61 \cdot 10^{-3})$$

$$\sin \varphi = \mathbf{0{,}631}$$

Quatrième étape : calcul des puissances

– écrire les formules de base $S = \frac{U^2}{Z}$

– introduire les valeurs et calculer $S = \frac{20^2}{23{,}3}\ [S] = \frac{\mathrm{V} \cdot \mathrm{V} \cdot \mathrm{A}}{\mathrm{A}} = \mathrm{VA}$

$S = \mathbf{17{,}18\ VA}$

		Vérifications :
– écrire la formule de base	$P_q = S \cdot \sin \varphi$	$P_q = U^2 \cdot (B_C - B_L)$
– introduire les valeurs et calculer	$P_q = 17{,}17 \cdot 0{,}631$	$P_q = 20^2 \cdot (37{,}7 - 10{,}61) \cdot 10^{-3}$
	$P_q = \mathbf{10{,}84\ vars}$	$P_q = \mathbf{10{,}84\ vars}$
	$P = S \cdot \cos \varphi$	$P = \frac{U^2}{R}$
	$P = 17{,}18 \cdot 0{,}777$	$P = \frac{20^2}{30}$
	$P = \mathbf{13{,}35\ W}$	$P = \mathbf{13{,}33\ W}$

Cinquième étape : grouper les résultats et les vérifier au moyen du diagramme vectoriel

$Z = \mathbf{23{,}3\ \Omega}$ $S = \mathbf{17{,}18\ VA}$ $P = \mathbf{13{,}35\ W}$ $P_q = \mathbf{10{,}84\ vars}$

$\cos \varphi = \mathbf{0{,}777}$ $\sin \varphi = \mathbf{0{,}631}$

D'après le diagramme vectoriel, le déphasage résultant est de 39°. Cet angle concorde avec les valeurs calculées du cosinus et du sinus. L'exactitude du calcul de l'impédance est confirmée au moyen de la représentation graphique. Les exercices vous permettent de vous contrôler vous-mêmes. Ils vous prouvent si vous avez assimilé correctement la matière. Cette dernière demande toujours plus d'attention. Ne passez au paragraphe suivant que si les problèmes ne vous ont pas causé de difficultés.

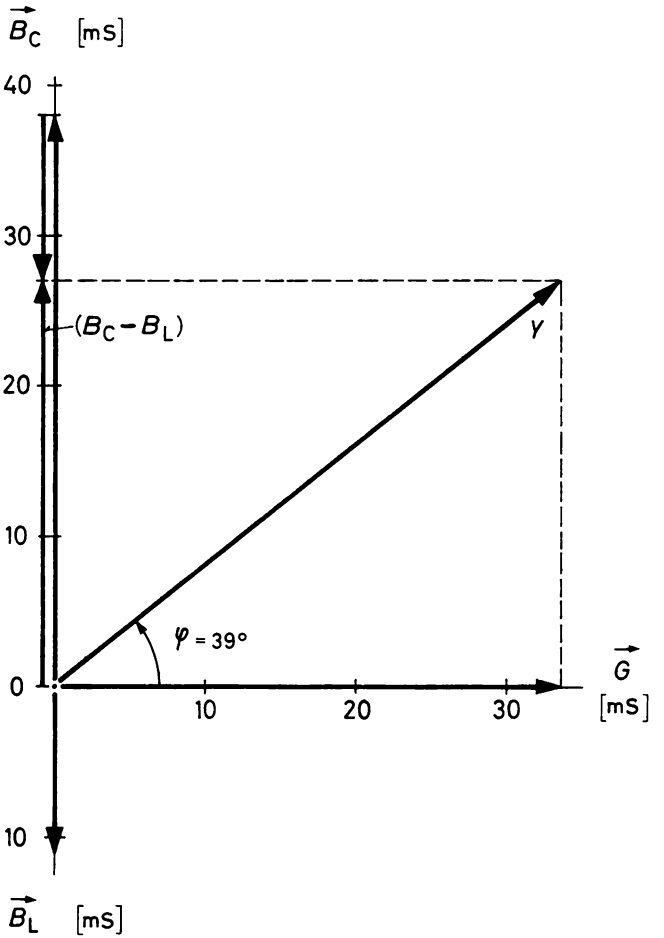


Figure pour la question 32 g

33. Que savez-vous concernant le transformateur?

Réponses aux questions a à f (page 242)

a) Un transformateur basse fréquence se compose d'un noyau en fer feuilleté (lamelles), d'un bobinage primaire et d'un bobinage secondaire.
b) Le transformateur de réseau permet de fournir les tensions d'alimentation aux appareils électriques à partir des diverses tensions du réseau.
c) Le rapport de transformation de tension, d'un transformateur, est déterminé par le rapport du nombre de spires des bobinages. Celui-là est dénommé: rapport de transformation et il est proportionnel au rapport de transformation de tension.
d) Le noyau du transformateur est feuilleté pour abaisser les pertes par courants de Foucault.
e) Le noyau augmente l'inductance des bobinages. Il provoque un couplage serré et augmente le rendement du transformateur.
f) Les transformateurs haute fréquence sont souvent construits sans noyau de fer. L'inductance requise et le couplage nécessaires s'obtiennent sans noyau de fer.

Appréciation:

6 ou 5 réponses exactes:	Très bien, vous avez déjà entendu parler des transformateurs. Ceux-ci sont des composants qui ne vous sont pas inconnus. La matière suivante vous initiera plus en détail en ce qui concerne la nature des transformateurs.
4 à 3 réponses exactes:	Vous disposez de bonnes connaissances préliminaires. Celles-ci vous permettront de travailler le sujet suivant avec facilité.
Moins de 3 réponses exactes:	Vous auriez dû pouvoir répondre à la question d car ce problème a déjà été traité dans le chapitre des inductances. Vous deviez pouvoir résoudre la question e sur la base de vos connaissances des inductances, alliées à un raisonnement logique. Retravaillez à fond le paragraphe concernant les inductances, son contenu est indispensable pour la compréhension correcte du transformateur.

34. Exercices de répétition concernant « VI. Le transformateur »

Réponses aux questions a à g (page 265)

a) Dans ce transformateur, le 95% du flux du primaire est actif dans le bobinage secondaire.

b) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base $\sigma = 1 - k^2$

– introduire les valeurs et calculer $\sigma = 1 - 0{,}92^2$

$\sigma = \mathbf{0{,}1536}$

c) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$

– introduire les valeurs et calculer $M = 0{,}6 \cdot \sqrt{5 \cdot 3}$

$M = \mathbf{2{,}323\ H}$

d) La section du fer d'un transformateur est déterminée pour un certain flux par la puissance à transmettre et la fréquence. Pour calculer la section nécessaire il faut encore connaître l'induction magnétique, la densité du courant dans le conducteur et le rapport entre le poids du cuivre et celui du fer en plus de la puissance et de la fréquence. Cependant, pour la plupart des transformateurs, ces données supplémentaires sont indiquées ainsi la section peut donc être déterminée en fonction de la puissance et de la fréquence.

e) La tension secondaire correspond au déphasage relatif de la tension d'induction mutuelle; cette dernière est la tension d'excitation, dans le transformateur, elle est toujours opposée à la tension primaire.

f) Les avantages de l'autotransformateur, par rapport à celui comportant des bobinages primaire et secondaire, sont – à puissance égale – des sections moindres du fer et du fil. Le grand inconvénient de l'autotransformateur est le manque de séparation galvanique entre la tension du primaire et celle du secondaire.

g) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base donnant le rapport de transformation $\ddot{u} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2}$

– extraire Z_1 $Z_1 = \frac{N_1^2}{N_2^2} \cdot Z_2$

– introduire les valeurs et calculer $Z_1 = (\frac{4000^2}{100^2}) \cdot 5$

$Z_1 = \mathbf{8\ k\Omega}$

$\ddot{u} = \mathbf{40}$

N'oubliez pas que les exercices de répétition ont un double but: d'une part ils astreignent l'élève à une répétition de la matière et d'autre part ils le renseignent sur l'état de ses connaissances.

35. Que savez-vous de ce qui concerne le circuit oscillant série ?

Réponses aux questions a à f (page 267)

a) Le circuit oscillant série se compose d'un condensateur et d'une bobine.
b) La fréquence de résonance d'un circuit oscillant est celle pour laquelle l'inductance et la capacitance sont égales. Le circuit oscillant agit comme une résistance ohmique lors de la résonance.
c) La qualité de la bobine d'un circuit oscillant est essentielle pour ce qui concerne son comportement. Plus sa valeur est élevée d'autant plus petite est la largeur de bande.
d) Les pertes dans le condensateur sont beaucoup plus petites que celles de la bobine, de ce fait, très souvent, elles ne sont pas prises en considération lors du calcul des pertes dans le circuit.
e) Les circuits oscillants série sont utilisés partout là où il s'agit de court-circuiter une fréquence indésirable. Lorsque des circuits série sont employés comme éléments de couplage entre deux composants ils ne transmettent alors que la fréquence de résonance. Une antenne peut être représentée comme un circuit série.
f) Les circuits oscillants présentent leurs propriétés typiques dans les environs de la fréquence de résonance. Le cas particulier de la résonance consiste en ce que, à la fréquence de résonance, l'inductance et la capacitance du circuit sont égales.

Appréciation:

6 à 5 réponses exactes :	Très bien, pour vous le circuit oscillant n'est plus une nouveauté. Vous disposez de bonnes connaissances qui vous permettront, sans difficulté, d'étudier plus à fond la nature du circuit oscillant.
4 à 3 réponses exactes :	Bon, vous avez bien travaillé la matière concernant les circuits série et parallèle. Le chapitre suivant traitant des circuits oscillants ne devrait vous causer aucune difficulté.
Moins de 3 réponses exactes :	Vous deviez pouvoir répondre correctement aux questions a, c et d. Les problèmes traitant des circuits série et parallèle composés d'impédances et de résistances n'ont pas été faits avec soin. Vous ne devez commencer l'étude du circuit oscillant que lorsque les processus dans les circuits série et parallèle composés de résistances et d'impédances vous seront devenus familiers.

36. Exercices de répétition concernant « VII. Le circuit oscillant série »

Réponses aux questions a à g (page 280)

a) A la résonance, la capacitance et l'inductance s'éliminent mutuellement par suite du déphasage de 180° qui existe entre elles. Il ne reste effectivement que la résistance de perte ohmique.

b) *Marche à suivre:*

– écrire la condition régissant la résonance $X_L = X_C$

– introduire les valeurs $\omega_o L = \dfrac{1}{\omega_o C}$

– isoler ω_o^2 $\omega_o^2 = \dfrac{1}{LC}$

– extraire la racine $\omega_o = \dfrac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$

– $\omega_o = 2\pi f$: l'introduire dans la formule et en tirer f_o $f_o = \dfrac{\mathbf{1}}{\mathbf{2\pi\sqrt{LC}}}$

c) *Marche à suivre:*

Première étape: calcul de la capacité

– écrire la formule du circuit oscillant $f_o = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

– extraire $\sqrt{LC}$ $\dfrac{1}{2\pi f_o} = \sqrt{LC}$

– élever au carré $\dfrac{1}{4\pi^2 f_o^2} = LC$

– extraire C $C = \dfrac{1}{4\pi^2 f_o^2 \cdot L}\ [C] = \dfrac{s^2A}{Vs} = \dfrac{As}{V}$

– introduire les valeurs et calculer $C = \dfrac{1}{4\pi^2 \cdot 25 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}$

$C = \mathbf{5{,}06\ nF}$

Deuxième étape: calcul de la qualité du circuit

– écrire la formule de base du calcul de Q $Q = \dfrac{\omega_o L}{R_v}$

– introduire les valeurs et calculer $Q = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{7}\ \dfrac{Vs\,A}{As\,V}$

$Q = \mathbf{89{,}7}$

Troisième étape: calcul de la largeur de bande

– écrire la formule de base donnant b $b = \dfrac{f_o}{Q}$

– introduire les valeurs et calculer $b = \dfrac{50 \cdot 10^{-3}}{89{,}7}$

$b = \mathbf{557\ Hz}$

d) *Marche à suivre:*
Première étape : calcul de la fréquence de résonance

– écrire la formule de base donnant b	$b = \frac{f_o}{Q}$
– extraire f_o de la formule	$f_o = b \cdot Q$
– introduire les valeurs et calculer	$f_o = 2 \cdot 10^3 \cdot 100$
	$f_o = 200$ kHz

Deuxième étape : calcul des réactances à la résonance

– écrire la condition régissant la résonance	$X_L = X_C$
– écrire la formule de base exprimant X_C	$X_C = X_L = Q \cdot R_v$
– introduire les valeurs et calculer	$X_C = 100 \cdot 4$
	$X_C = 400\ \Omega$

Troisième étape : calcul de la capacité du circuit

– écrire la formule de base exprimant X_C	$X_C = \frac{1}{\omega_o \cdot C}$
– extraire C	$C = \frac{1}{\omega_o X_C}$
– introduire les valeurs et calculer	$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}2 \cdot 10^6 \cdot 400}$
	$C =$ **1,99 nF**

e)

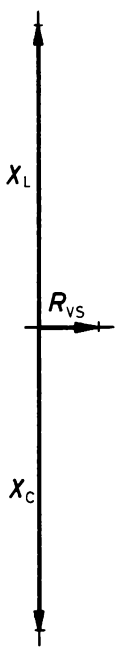


Figure pour la question 36 e

f) La qualité du circuit correspond pratiquement à la qualité de la bobine parce que les pertes capacitives peuvent être négligées par rapport aux pertes dans la bobine. (En général, les pertes dans le condensateur sont considérablement plus petites que celles dans la bobine.)
g) La largeur de bande est un indice de la qualité d'un circuit oscillant. Pour une fréquence de résonance constante, plus la largeur de bande est petite d'autant plus élevée est la qualité du circuit. La qualité du circuit s'exprime par le quotient de la fréquence de résonance par la largeur de bande.

Au cas où la solution des exercices de répétition ne vous a causé aucune difficulté vous pouvez vous tourner vers le paragraphe suivant. Si l'exécution des problèmes posés vous a, en revanche, occasionné quelque peine vous ne devez pas continuer la lecture avant d'avoir écarté toutes les incertitudes de votre chemin.

37. Que savez-vous concernant le circuit oscillant parallèle?

Réponses aux questions a à e (page 282)
a) Le circuit oscillant parallèle se compose d'une bobine et d'un condensateur qui sont reliés en parallèle.
b) Oui, la qualité de la bobine joue un rôle dans la qualité d'un circuit oscillant parallèle.
c) Oui, la formule de Thomson est aussi valable pour le circuit oscillant parallèle. Dans les circuits dont la qualité est très mauvaise, la fréquence calculée avec la formule de Thomson n'est, cependant, pas tout à fait exacte. Pour les circuits qui se rencontrent dans la pratique, l'erreur est toutefois si minime qu'elle peut être négligée.
d) Les circuits en parallèle servent à prélever, par filtrage, une fréquence déterminée dans un spectre de fréquences. Ils peuvent également être utilisés pour bloquer une fréquence sélectionnée, on parle dans ce cas d'un circuit bouchon, réjecteur, éliminateur ou piège d'ondes. Dans les émetteurs, les circuits oscillants parallèles sont les composants qui déterminent la fréquence un peu comme un diapason dans un générateur à diapason.
e) Oui, la qualité de la bobine dans le circuit parallèle a la même signification que pour le circuit série. Plus la qualité de la bobine est élevée d'autant plus faible sera la largeur de bande.

Appréciation:
Vous deviez être capable de répondre à chaque question conformément à son sens exact. Le circuit oscillant parallèle a tant de points communs avec le circuit oscillant série que la plupart des réponses aux questions ne devaient pas vous sembler difficiles. C'est pour cette raison que nous renonçons à une appréciation adéquate.

38. Exercices de répétition concernant « VIII. Le circuit oscillant parallèle »

Réponses aux questions a à h (page 301)

a) Lors de la résonance, le circuit oscillant parallèle présente sa plus grande impédance, en revanche, le circuit série possède son impédance la plus faible.

b) La qualité du circuit parallèle correspond au quotient de la résistance de perte parallèle par la réactance à la résonance.

c)

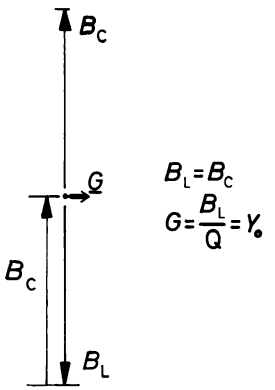


Figure pour la question 38 c

d) A la résonance, les courants réactifs dans le circuit sont Q fois plus grands que le courant efficace.

e) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base pour le calcul de Q	$Q = \frac{R_{vp}}{X_L}$
– extraire R_{vp} de la formule	$R_{vp} = Q \cdot X_L$
– introduire les valeurs et calculer	$R_{vp} = 230 \cdot 1200$
	$R_{vp} = \mathbf{276\ k\Omega}$

f) Le circuit parallèle agit comme une capacité. Ainsi, son schéma équivalent se compose d'une capacité aux bornes de laquelle est reliée une résistance de perte ohmique.

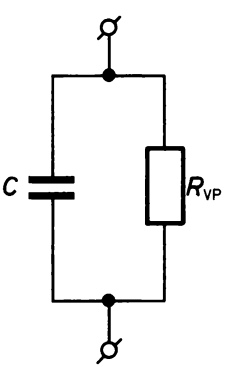


Figure pour la question 38 f

g) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base qui exprime b $\quad b = \frac{f_o}{Q}$

– introduire les valeurs et calculer $\quad b = \frac{600}{250}$

$b = \mathbf{2{,}4\ kHz}$

h) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de base de la fréquence f_o $\quad f_o = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$

– extraire C de la formule $\quad \frac{1}{f_o} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}$ d'où $\frac{1}{2\pi f_o} = \sqrt{LC}$ d'où

$$\frac{1}{4\pi^2 f_o^2} = LC \text{ d'où } C = \frac{1}{4\pi^2 f_o^2 L}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 2{,}8^2 \cdot 10^{12} \cdot 30 \cdot 10^{-6}}$$

$C = \mathbf{107{,}7\ pF}$

Appréciation:
Les exercices de répétition vous ont montré, une fois de plus, la différence de comportement entre les circuits parallèle et série. Le circuit oscillant est l'un des composants les plus importants de la technique des télécommunications. Seul, celui qui a compris parfaitement son fonctionnement pourra, dans un stade ultérieur, se représenter exactement le fonctionnement de chacun des étages d'un appareil.
Celui qui n'est pas parvenu, lors des exercices de répétition, à répondre avec facilité doit nécessairement retravailler la matière concernant les circuits oscillants série et parallèle. Le prochain paragraphe, qui explique les filtres de bande, présuppose la compréhension des circuits oscillants.

39. Que savez-vous concernant les filtres de bande?

Réponses aux questions a à e (page 303)

a) Le filtre de bande présente une plus grande raideur des flancs que celle d'un simple circuit (une bobine + un condensateur). On peut varier sa largeur de bande en changeant le coefficient de couplage.

b) La largeur de bande d'un simple circuit est déterminée par la fréquence de résonance et la qualité du circuit; elle correspond au quotient de la fréquence de résonance par sa qualité

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

c) On distingue trois sortes de couplages pour les filtres de bande :
   – couplage inductif
   – couplage capacitif
   – couplage galvanique
d) Si les exigences concernant les courbes de passage dans les filtres de bande sont plus sévères, les filtres comportant deux circuits ne suffisent plus et l'on doit recourir alors à des filtres composés de plusieurs circuits.
e) Le couplage inductif est une sorte de couplage dans lequel le transfert d'énergie du circuit primaire au circuit secondaire a lieu au moyen d'un champ magnétique commun ou par une bobine de couplage.

Appréciation:
Vous deviez, cela va de soi, pouvoir répondre sans erreur à la question b. Concernant la question e, le couplage dans le transformateur par son champ magnétique devait vous être familier. Les autres questions, auxquelles vous avez pu répondre en plus, vous montrent que vous possédez déjà de bonnes connaissances préliminaires en ce qui concerne les filtres de bande.

40. Exercices de répétition concernant « IX. Filtres de bande »

Réponses aux questions a à h (page 315)
a) Le filtre de bande présente une plus grande raideur des flancs que celui composé d'un seul circuit ce qui permet d'obtenir une meilleure sélectivité. Par des moyens simples, la largeur de bande peut être modifiée à volonté. L'association de plusieurs circuits oscillants en un filtre de bande permet d'obtenir une courbe de réponse de forme quasi rectangulaire.
b) Les filtres de bande sont employés partout où il est nécessaire de prélever parmi un spectre de fréquences, un signal ayant une largeur de bande déterminée, avec la meilleure sélectivité possible. Les exemples les plus courants, tirés de la technique des télécommunications, sont :
   – amplificateurs moyenne fréquence dans les récepteurs ;
   – filtres pour produire la modulation à bande latérale unique dans les émetteurs ;
   – filtres de basse fréquence dans les installations de téléphonie à canaux multiples.
c) Les filtres de bande peuvent se coupler de façon inductive, capacitive ou galvanique.
d) La courbe de passage des filtres de bande est influencée par la qualité du circuit et le coefficient de couplage.
e) Lorsque le couplage est dit « critique », le produit de la qualité du circuit par le coefficient de couplage est égal à 1. $k \cdot Q = 1$.
f) La formation de bosses se produit pour tous les coefficients de couplage trop serrés.

g)

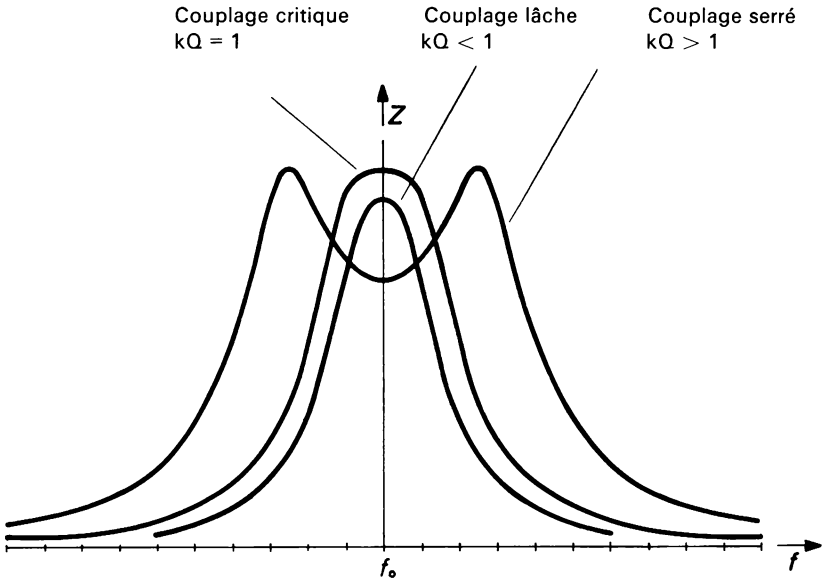


Figure pour la question 40 g

h) Lorsque des filtres ont un couplage inductif, le coefficient de couplage peut être varié en tournant simplement l'une des bobines du circuit par rapport à l'autre (ou en variant la distance qui les sépare).

Appréciation:
Vous devriez être capable de répondre correctement à toutes les questions posées. Les questions ne concernaient que les connaissances essentielles qu'un praticien doit avoir des filtres de bande. Jusqu'à nouvel ordre, nous quittons la technique des courants alternatifs pour nous tourner vers d'autres composants de l'électronique.
Le débutant devrait prendre à cœur le conseil suivant:
L'expérience nous a enseigné que chaque matière nouvelle devait être repétée plusieurs fois si l'on ne veut pas de nouveau perdre tout son savoir. Les recherches ont montré que le rythme des répétitions exerce une influence essentielle sur le rendement de l'étude. Les meilleurs résultats s'obtiennent lorsque l'on répète la nouvelle matière après deux jours, deux semaines et quelques mois. La matière de ce cours est exposée de façon telle que chacun puisse la répéter à volonté, sans aide extérieure, grâce aux exemples qu'il contient. Utilisez cet avantage: tout ce qui vous a été apporté jusqu'ici vous sera utile dans la pratique.

41. Que savez-vous au sujet des diodes ?

Réponses aux questions a à f (page 317)

a) La diode se compose de deux électrodes. Les électrodes se trouvent dans une ampoule de verre ou d'acier dans laquelle on a fait le vide. L'une des électrodes, la cathode, est chauffée et se met à émettre des électrons. L'autre électrode, l'anode, consiste en un cylindre de tôle disposé de façon concentrique autour de la cathode. L'anode a pour fonction de capter les électrons émis par la cathode.

b) Le système des électrodes de la diode se trouve dans le vide afin qu'un flux de courant puisse s'établir entre la cathode et l'anode. Presque aucune molécule gazeuse et aucun atome ne se trouve plus dans le vide car ceux-ci pourraient gêner les électrons sur leur chemin entre la cathode et l'anode.

c) Les électrons peuvent quitter la cathode dès que leur énergie de mouvement est supérieure aux forces d'attraction électrostatiques. Cette énergie de mouvement est fournie aux électrons sous forme de chaleur (énergie thermique). Dans un conducteur chauffé, les électrons exécutent des mouvements tourbillonnaires plus énergiques que ceux se trouvant dans un milieu froid.

d) Le courant anodique d'une diode peut être augmenté en élevant la tension de chauffage ou la tension d'anode. En pratique, seule l'augmentation de la tension d'anode entre en ligne de compte car la tension de chauffage doit être maintenue constante pour tous les divers types de tubes.

e) Une cathode à chauffage indirect se compose d'un petit tube métallique recouvert d'une couche spéciale facilitant l'émission des électrons. A l'intérieur du petit tube se trouve un filament de chauffage, enroulé en spirale, qui est isolé électriquement par rapport au tube.

f) Tous les électrons qui sortent de la cathode n'arrivent pas à l'anode et un certain nombre d'entre eux forment un nuage électronique autour de la cathode. Ce nuage d'électrons est nommé charge d'espace. Dans les tubes où la tension anodique est suffisamment élevée pour que tous les électrons atteignent l'anode, la charge d'espace disparaît.

Appréciation:

Celui qui n'a encore jamais travaillé avec les tubes électroniques aura de la peine à répondre exactement à l'une ou l'autre de ces questions. Si vous n'avez pas réussi à répondre exactement à l'une des questions cela signifie qu'une nouvelle et intéressante matière vous attend. Vous n'avez pas besoin de connaissances préliminaires pour vous mettre au courant de la technique des tubes électroniques. Les bases que vous avez acquises jusqu'à présent suffisent amplement à comprendre ce nouveau sujet.
Au cas où vous auriez déjà eu affaire avec les tubes électroniques, cette petite épreuve vous montre ce que vous devez encore savoir concernant les diodes.

42. Exercices de répétition concernant « I. La diode »

Réponses aux questions a à k (page 332)

a) Dans le vide, les électrons peuvent se mouvoir librement. La probabilité d'un choc avec les molécules gazeuses encore présentes est très faible. Dès qu'une source d'électrons est disponible (cathode) et que ceux-ci sont mis en mouvement par un potentiel positif (anode), un flux de courant a lieu.

b) Dès que la cathode est chauffée à une certaine température, le mouvement propre des électrons par suite de l'énergie calorifique qui leur est fournie accroît l'amplitude de leurs mouvements ce qui leur permet de vaincre les forces d'attraction de la structure moléculaire et de quitter la cathode.

c) La charge d'espace agit comme un frein sur les électrons qui quittent la cathode et empêche ainsi que le courant anodique croisse proportionnellement à la tension d'anode. C'est pour cette raison que la caractéristique est courbe.

d)

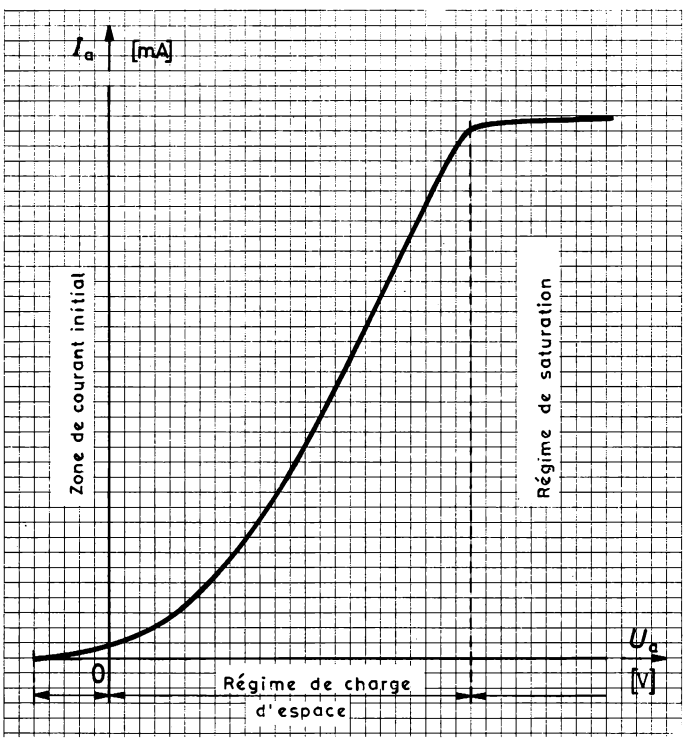


Figure pour la question 42 d

e) A la condition que seule une tension anodique soit appliquée à la diode, la puissance de dissipation anodique est déterminée par la tension anodique multipliée par le courant du même nom.

$$P_{ad} = U_a \cdot I_a$$

f) Le courant initial est produit par les électrons qui possèdent une grande vitesse de sortie, ce qui leur permet d'atteindre une anode dont le potentiel est nul ou légèrement négatif.

g) La puissance de dissipation anodique est celle qui est transformée en chaleur dans la tôle de l'anode.

h)

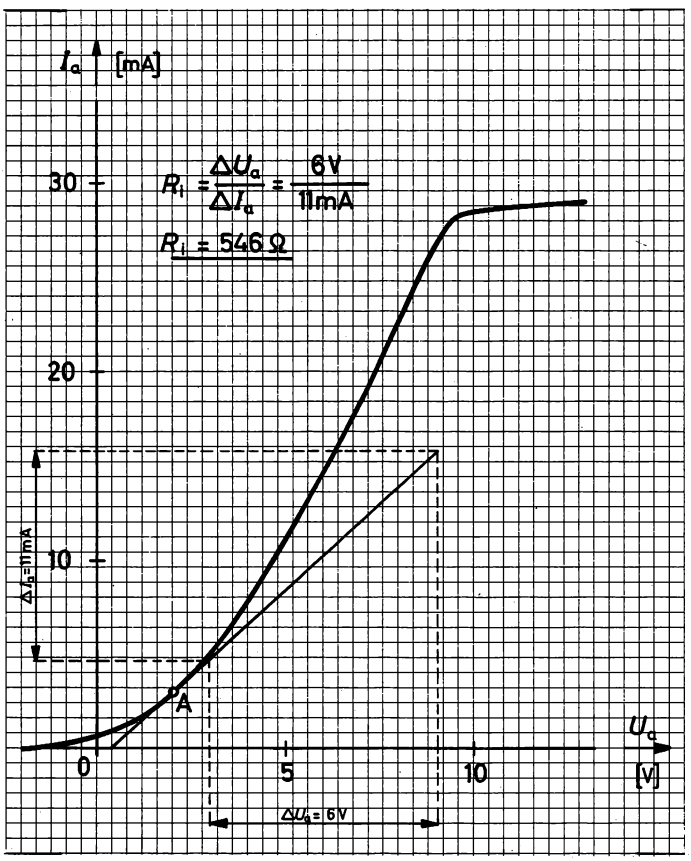


Figure pour la question 42 h

i) La résistance interne en courant continu d'une diode résulte du quotient de la tension anodique par le courant anodique pour un point de fonctionnement déterminé.

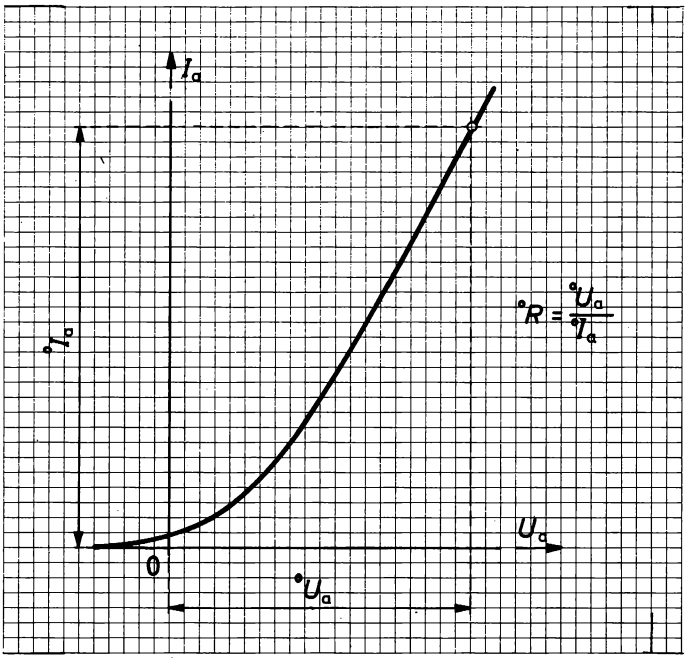


Figure pour la question 42 i

k) La résitance interne en courant alternatif de la diode a une importance dans tous les circuits où cette résistance est commandée puis utilisée comme grandeur variable. De tels circuits se trouvent souvent dans les anciens petits émetteurs à modulation de fréquence. La résistance interne en courant alternatif commandée est utilisée dans ce cas pour produire la modulation de fréquence.

Appréciation:
Cela ne devait pas vous paraître difficile de répondre exactement à toutes les questions. Cependant, si cette épreuve vous a causé des difficultés cela signifie que vous n'avez pas travaillé le sujet avec assez d'attention.

43. Que savez-vous de ce qui concerne les triodes?

Réponses aux questions a à f (page 334)
a) Une triode se compose d'un système à trois électrodes.
b) Les électrodes de la triode se nomment: la cathode, la grille et l'anode.
c) Le courant anodique de la triode est commandé par la grille.

d) La pente est une mesure de l'effet de commande de la grille sur le courant anodique. Elle s'exprime par le rapport de la variation du courant anodique à la variation de la tension de grille.
e) Oui, dans la zone où la tension de grille est négative, la commande ne nécessite aucune puissance.
f) Oui, les triodes qui ont les dimensions adéquates peuvent être utilisées comme amplificatrices de puissance.

Appréciation:
Avez-vous réussi à répondre à toutes les questions? Pour chaque réponse exacte vous pouvez marquer un point. Cela vous montre que vous apportez quelques connaissances préliminaires qui vous faciliteront l'étude, très intéressante, de la matière qui suit.

44. Exercices de répétition concernant « II. La triode »

Réponses aux questions a à i (page 344)
a) Une grille, polarisée positivement, se comporte comme une anode dont la tension est positive: un courant s'écoule, c'est le courant de grille. Ce courant de grille charge toutes les sources de signaux: le tube ne peut plus être commandé sans puissance et de plus, les distorsions pour ce point de fonctionnement sont si grandes que l'amplification de signaux basse fréquence n'a pas de sens dans la zone de polarisation positive de grille.
b)

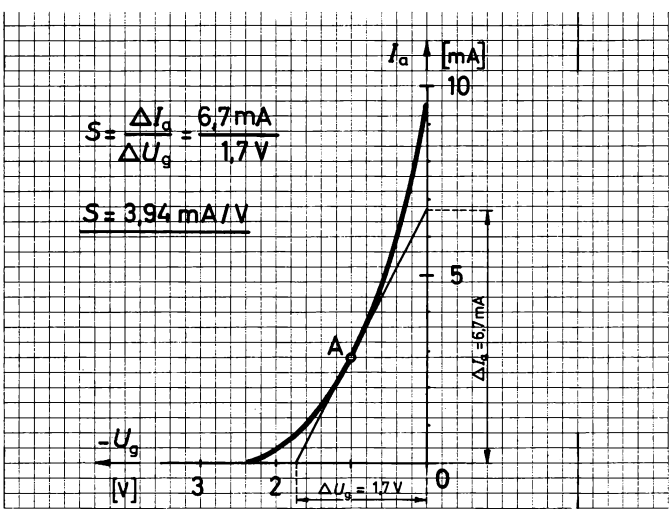


Figure pour la question 44 b

c) La pente est une mesure de l'effet de commande de la grille sur le courant anodique. Elle résulte du quotient de la variation du courant d'anode par la variation de la tension de grille. L'unité de mesure de la pente est le milliampère par volt.

d)

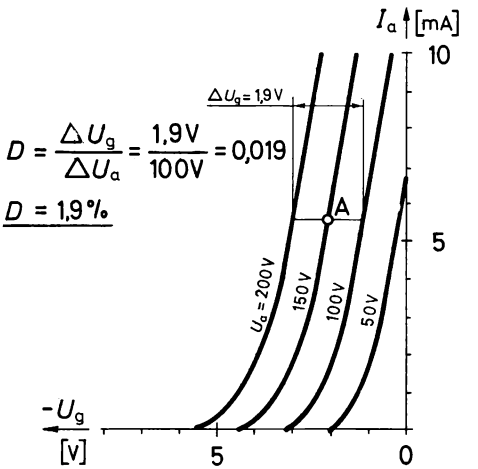


Figure pour la question 44 d

e) Le coefficient d'amplification correspond à la valeur réciproque de la transparence de grille.

$$\mu = \frac{1}{D}$$

$$\mu = \frac{1}{1{,}9 \cdot 10^{-2}}$$

$$\mu = \mathbf{52{,}7}$$

f)

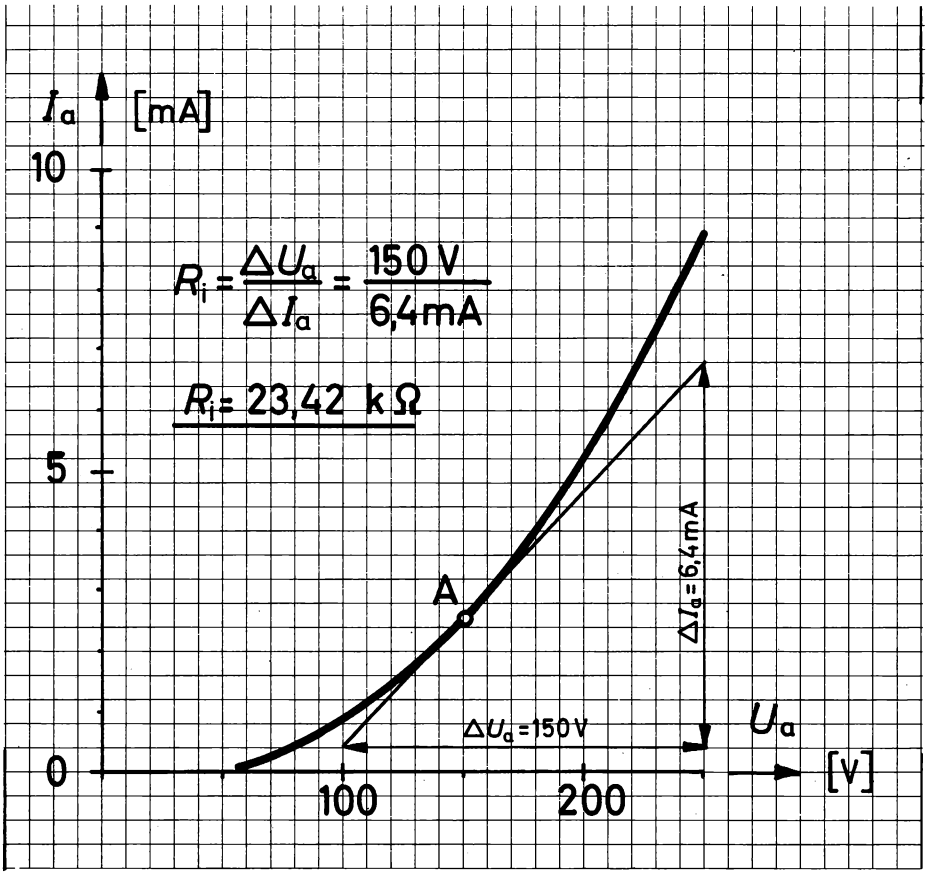


Figure pour la question 44 f

g) Si, des trois données déterminant les propriétés d'un tube deux sont connues alors la troisième – inconnue – peut se calculer au moyen de l'équation de Barkhausen.

Marche à suivre:

– écrire la formule de Barkhausen $S \cdot D \cdot R_i = 1$

– remplacer D par μ $\frac{SR_i}{\mu} = 1$

– extraire S de la formule $S = \frac{R_i}{\mu}$ $[S] = \frac{1}{V/A} = \frac{A}{V}$

– introduire les valeurs et calculer

$$S = \frac{40}{15 \cdot 10^3}$$

$$S = \mathbf{2{,}67\ mA/V}$$

h) *Marche à suivre:*

– écrire la formule de Barkhausen

$$S \cdot D \cdot R_i = 1$$

– remplacer, dans la formule, les symboles S, D, R_i par les équations qui les déterminent

$$\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \cdot \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = 1$$

Les numérateurs et les dénominateurs s'annulent mutuellement, il ne reste que la valeur 1, ce qui démontre ainsi l'exactitude de l'équation.

i) Les principaux domaines d'utilisation des triodes sont:
- amplification basse fréquence;
- production d'oscillations (oscillateurs);
- technique des mesures;
- amplification de très hautes fréquences dans des cas spéciaux.

Appréciation:

Dans ce chapitre, vous avez appris comment déterminer les données principales des tubes et comment elles peuvent être déduites à partir des courbes caractéristiques. Ces données sont encore les mêmes pour tous les types de tubes et leur signification reste la même. Avec ces données en mains, le praticien peut vérifier de manière approximative l'amplification d'un étage. La connaissance des caractéristiques des tubes et de leur signification sont à la base de la compréhension de tous les circuits comportant des tubes; nous les retrouverons, sous une autre forme, lors de l'étude des semiconducteurs. Par conséquent, il est important que vous ayez bien compris cette matière; aucune incertitude ne doit rester dans l'ombre.

Si, lors de la solution des exercices de répétition, des fautes vous sont apparues vous devez les éliminer avant de continuer l'étude des tubes.

45. Que savez-vous concernant la pentode?

Réponses aux questions a à e (page 346)

a) La pentode comporte 5 électrodes: cathode, grille de commande, grille écran, grille d'arrêt (ou suppresseuse) et anode.

b) Par rapport à la triode, la pentode possède une résistance interne bien plus élevée et une transparence de grille remarquablement plus petite.

c) La petite transparence de grille de la pentode a comme conséquence un coefficient d'amplification élevé puisque ces deux grandeurs sont mutuellement réciproques.

d) La résistance interne, plus élevée, de la pentode se voit à l'allure plus aplatie de sa caractéristique $I_a - U_a$.

e) La transparence de grille, plus petite, de la pentode a pour effet de resserrer la distance entre les courbes $I_a - U_g$ dans le réseau de caractéristiques. Les différentes courbes sont si près l'une de l'autre qu'elles se recouvrent presque. Dans le réseau de caractéristiques $I_a - U_g$ c'est

la tension de grille écran qui, pour cette raison, est le plus souvent choisie comme paramètre car son influence sur le courant anodique est bien plus grande que celle de la tension d'anode. Le plus souvent, la transparence de grille n'est pas du tout mentionnée dans les données concernant les tubes car la pentode est décrite avec une précision suffisante par sa pente et sa résistance interne.

Appréciation:
Vous deviez pouvoir répondre exactement aux questions c, d et e. La question c présuppose essentiellement que l'équation de Barkhausen est connue. Les questions d et e vous montrent si vous avez compris la dépendance entre les données des tubes et leurs courbes caractéristiques. Au cas où la réponse à ces trois questions vous a créé des difficultés c'est le signe que vous n'avez pas travaillé à fond le chapitre traitant de la triode qui est la condition préalable pour comprendre la pentode.

46. Exercices de répétition concernant « III. La pentode »

Réponses aux questions a à k (page 357)

a) Les avantages de la pentode par rapport à la triode sont les suivants:
   - résistance interne plus élevée;
   - transparence de grille plus petite;
   - capacité grille-anode plus petite.

b) L'influence de la grille écran est importante. Cependant, la grille écran ne doit pas commander le courant anodique et, par conséquent, sa tension de service est maintenue constante. Les étages amplificateurs à contrôle automatique de gain en sont une exception car, dans ceux-là, l'effet de commande du courant anodique par la grille écran est également mis à profit.

c) La grille écran protège la grille de commande contre le champ électrique de l'anode (effet de blindage) d'où il s'ensuit que l'influence de la tension anodique sur le courant d'anode est fortement diminuée.

d) En règle générale, la grille suppresseuse (ou d'arrêt) est reliée à la cathode ou bien à la masse.

e) La grille suppresseuse sert à freiner les électrons secondaires émis par l'anode, ce qui a pour effet de les obliger de retourner vers l'anode.

f)

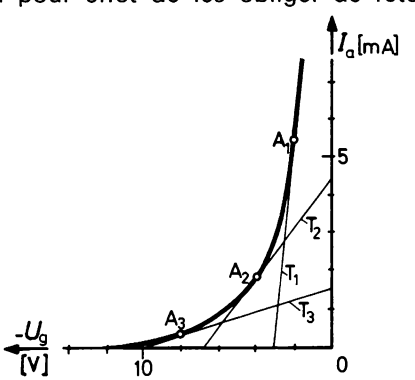


Figure pour la question 46 f

La courbe caractéristique $I_a - U_g$ est fortement coudée. Cette courbure est telle que la pente diminue lorsque la polarisation de grille est de plus en plus négative. La pente, au point de fonctionnement A_2 est plus petite que celle au point de fonctionnement A_1, en A_3 elle est encore plus petite qu'en A_2. Une plus petite pente est synonyme d'une amplification plus faible. L'amplification d'un tube régulateur dépend, par conséquent, du choix du point de fonctionnement et ainsi de la grandeur de la tension de polarisation sur la grille de commande.

g) Les pentodes à pente variable sont, avant tout, utilisées dans le montage des récepteurs et dans les appareils de mesure.

h) De la petite transparence de grille de la pentode résulte un coefficient d'amplification élevé. La grande résistance interne contribue également à augmenter l'amplification, tandis que la faible capacité grille-anode évite la production d'oscillations indésirables.

i)

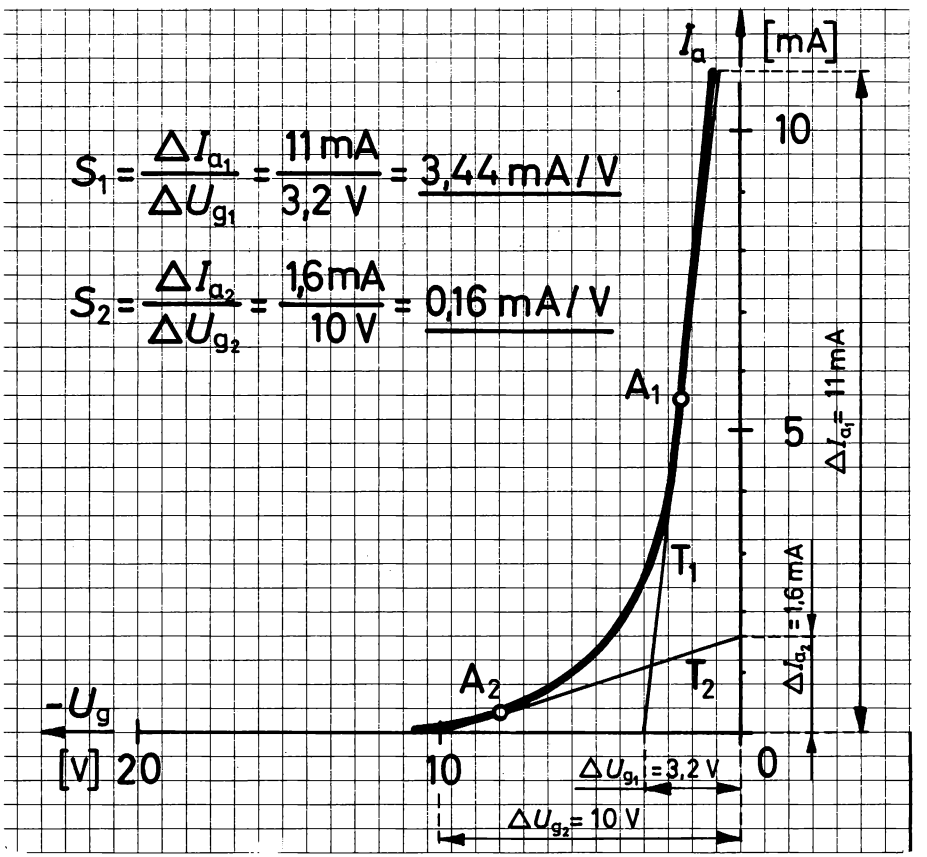


Figure pour la question 46 i

k)

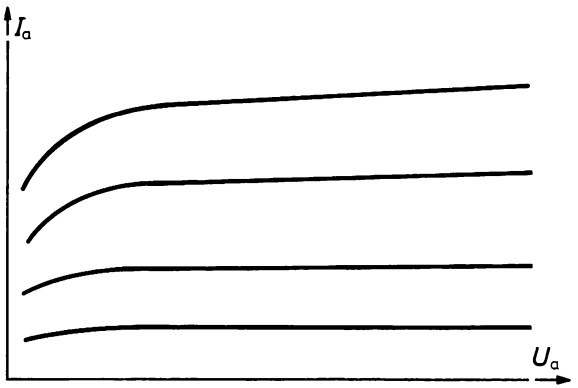


Figure pour la question 46 k

Le tracé assez plat des courbes caractéristiques montre le peu d'influence que la tension anodique exerce sur le courant anodique. La tension anodique peut varier dans une zone très étendue sans que cela se remarque sur le courant anodique. Ce comportement du tube a pour conséquence une grande résistance interne. La tangente qui permet de déterminer la résistance interne a un tracé très plat pour tous les points de fonctionnement à l'intérieur de limites assez étendues. Une faible pente de la tangente signifie une grande résistance interne.

Appréciation:
La description de la pentode se basait sur le principe de fonctionnement de la triode. Bien des notions ont été répétées. Les bases de la technique des tubes ne devraient plus, maintenant, vous causer de difficultés d'aucune sorte.

47. Que savez-vous concernant les pentodes de puissance?

Réponses aux questions a à f (page 358)

a) La résistance interne d'une pentode de puissance est notablement plus petite que celle d'une pentode amplificatrice de tension. Puisque la pente d'un tube de puissance n'augmente pas avec ses dimensions et que la résistance interne diminue il s'ensuit une augmentation de la transparence de grille. Par le fait que la transparence de grille est plus grande, les capacités entre chacune des électrodes du tube croissent aussi.

b) Non, l'allure du tracé caractéristique $I_a - U_a$ pour une pentode de puissance et une pentode amplificatrice de tension est la même à la différence de forme près. Enoncé clairement, la résistance interne plus petite provient en grande partie d'un courant anodique plus élevé.

c) La puissance de dissipation anodique est celle qui est transformée en chaleur dans l'anode. Dans un amplificateur final, elle correspond à la

différence entre le courant continu amené à l'anode et la puissance alternative délivrée à la sortie.

d) La grandeur du courant anodique dépend de la capacité émissive de la cathode. De grandes cathodes peuvent émettre de forts courants anodiques mais nécessitent une plus grande puissance de chauffage.
e) Les pentodes de puissance ont un meilleur rendement et nécessitent moins de tension de commande que les triodes de puissance.
f) La puissance de dissipation d'anode limite la puissance alternative délivrée. Plus la puissance de dissipation anodique admissible est grande d'autant plus élevée sera la puissance alternative disponible. La puissance de dissipation anodique, indiquée dans les caractéristiques des tubes, ne doit pas être dépassée sinon le tube est détruit.

Appréciation:
Vous deviez pouvoir répondre à la question c, la notion de puissance de dissipation anodique ayant été déjà définie. La seule nouveauté est que, dans un amplificateur final, la puissance de dissipation anodique est définie comme étant la différence entre la puissance du courant continu fournie à l'anode et la puissance en courant alternatif délivrée. Vous deviez pouvoir répondre à la question d à l'aide d'un raisonnement logique. Vous deviez, également, trouver la réponse à la question f sur la base de vos connaissances.

48. Exercices de répétition concernant « IV. La pentode de puissance »

Réponses aux questions a à f (page 364)

a) La pentode de puissance travaille avec des courants notablement plus élevés qu'un tube amplificateur de tension; ces courants anodiques intenses impliquent une résistance interne beaucoup plus petite car de plus grandes variations de courant anodique se produisent.
b) La zone située au-dessous de l'hyperbole de puissance, dans le réseau de caractéristiques $I_a - U_a$ n'est pas critique en ce qui concerne une surcharge du tube, car là, la puissance de dissipation anodique maximale admissible n'est jamais dépassée.
c) Pour chaque valeur de la tension anodique on cherche l'intensité du courant, cette dernière multipliée par la valeur de la tension correspondante donne pour résultat la puissance de dissipation anodique. Le point d'intersection entre la valeur du courant anodique et sa tension se situe sur l'hyperbole de puissance.
d) La puissance de dissipation anodique est celle qui est transformée en chaleur dans l'anode. Dans les tubes amplificateurs, elle correspond à la différence entre la puissance en courant continu prélevée par l'anode et la puissance en courant alternatif délivrée. Lorsque le tube n'est pas commandé, la puissance de dissipation anodique est la même que la puissance en courant continu prélevée par l'anode.
e) La pentode de puissance doit fournir une puissance alternative de sortie.

f) Les principaux domaines d'utilisation des pentodes de puissance sont:
   – étages finals dans les amplificateurs de puissance en basse fréquence;
   – étages finals dans les émetteurs (amplification de puissance en haute fréquence).

   Les tubes de puissance sont souvent utilisés à d'autres fins comme, par exemple, dans les alimentations stabilisées, pour la commande de relais et de petits moteurs ou encore comme oscillateurs dans les appareils de thérapie à haute fréquence.

Appréciation:
Dans ce chapitre, il s'agissait de préciser la différence entre une pentode amplificatrice et une pentode de puissance. Les exercices d'épreuve vous ont montré si vous avez effectivement gagné des points.

49. Que savez-vous concernant les tubes mélangeurs?

Réponses aux questions a à e (page 365)

a) Oui, la triode se prête pour opérer un mélange additif. Lors du mélange additif, les deux signaux à mélanger sont appliqués à la même électrode.
b) Les autres tubes multigrilles sont:
   – l'hexode = cathode, anode et quatre grilles;
   – l'heptode = cathode, anode et cinq grilles;
   – l'octode = cathode, anode et six grilles.
c) Un tube multiple est celui qui contient deux ou plusieurs systèmes dans la même ampoule. Parmi les tubes mélangeurs, la triode-hexode et la triode-heptode sont les plus utilisées.
d) Les tubes possédant plusieurs grilles de commande permettent une double commande du courant anodique. On entend par là la commande du courant par divers facteurs indépendants l'un de l'autre.
e) Un étage mélangeur sert à mélanger deux signaux qui ont des fréquences différentes. A la sortie de l'étage mélangeur il se produit un grand nombre de fréquences. La somme et la différence des fréquences d'entrée apparaissent de façon particulièrement marquée. Au moyen de filtres de bande, la somme ou la différence des fréquences est sélectionnée (accord sélectif).

Appréciation:
Vous deviez pouvoir répondre exactement à la question d. Les connaissances que vous avez acquises jusqu'à présent devaient vous permettre de trouver la solution exacte. Bien que le processus de la double commande soit nouveau pour vous, la connaissance des phénomènes dans les tubes électroniques devait, toutefois, vous rendre capable d'en tirer les conclusions convenables. On ne pouvait pas répondre aux autres questions sans connaissances préliminaires. Chaque réponse exacte vous montre que la matière suivante n'est pas absolument nouvelle pour vous.

50. Exercices de répétition concernant « V. Les tubes mélangeurs »

Réponses aux questions a à n (page 376)

a) Dans le circuit d'un récepteur, la fréquence d'entrée est mélangée avec la fréquence d'oscillation dans un étage mélangeur. La fréquence d'oscillation est produite par un oscillateur. La différence entre les fréquences, nommée moyenne fréquence, est amplifiée par l'amplificateur moyenne fréquence qui fait suite au mélangeur.

b) La condition préalable pour mélanger deux fréquences est la non-linéarité de la caractéristique de l'étage mélangeur.

c) La moyenne fréquence résulte de la différence entre la fréquence de l'oscillateur et la fréquence de réception.

$$f_z = f_o - f_e$$
$$f_z = 1870 - 1400 \text{ kHz}$$
$$f_z = \mathbf{470 \text{ kHz}}$$

d) Dans une hexode, le courant cathodique est principalement déterminé par la première grille de commande.

e) La seconde grille de commande d'une hexode agit comme grille de répartition. Elle répartit le courant du tube entre la grille écran et l'anode. Plus sa tension de polarisation est négative plus le courant de grille écran augmente ce qui a pour effet de diminuer le courant anodique.

f) L'heptode possède une grille de plus que l'hexode. Cette grille suppresseuse, supplémentaire, améliore les propriétés du tube au point de vue du bruit de fond.

g) L'heptode est presque uniquement employée comme tube mélangeur ou convertisseur.

h) Un convertisseur est un étage mélangeur qui travaille simultanément comme tube mélangeur et oscillateur.

i) L'octode n'est employée exclusivement que comme tube convertisseur.

k) Un tube multiple contient plusieurs systèmes de tubes dans la même ampoule. Des triodes-hexodes et des triodes-heptodes sont principalement montées dans les étages mélangeurs.

l) La pente de conversion s'exprime par le rapport entre le courant moyenne fréquence et la tension haute fréquence d'entrée.

$$S_c = \frac{I_z}{U_{g1}}$$

m) Le gain de conversion correspond au rapport entre la tension moyenne fréquence et la tension haute fréquence.

$$v_c = \frac{U_z}{U_{g1}}$$

n) *Marche à suivre:*
Première étape: calculer la tension moyenne fréquence au circuit oscillant

– écrire la formule $v_c = \frac{U_z}{U_{g1}}$

– extraire U_z de la formule $U_z = v_c \cdot U_{g1}$

– introduire les valeurs et calculer $U_z = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 120\ \text{V}$

$U_z = 0{,}96\ \text{V}$

Deuxième étape: calcul du courant moyenne fréquence

– écrire la formule de base $S_c = \frac{I_z}{U_{g1}}$

– extraire I_z de la formule $I_z = S_c \cdot U_{g1}$

– introduire les valeurs et calculer $I_z = 0{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{A}}{\text{V}} \cdot \text{V}$

$I_z = 6{,}4\ \mu\text{A}$

Troisième étape: calcul de l'impédance du circuit

– écrire la formule de base $Z_o = \frac{U_z}{I_z}$

– introduire les valeurs et calculer $Z_o = \frac{0{,}96}{6{,}4 \cdot 10^{-6}} \frac{\text{V}}{\text{A}}$

$Z_o = 150\ \Omega$

Quatrième étape: calcul de la qualité du circuit

– écrire la formule de base qui donne Q $Q = \frac{Z_o}{X_L}$

– écrire la formule de base qui exprime X $X_L = \omega L$

– remplacer X_L par ω_L dans la première formule $Q = \frac{Z_o}{\omega \cdot L}$

– introduire les valeurs et calculer $Q = \frac{150 \cdot 10^3}{2\pi 470 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} \frac{\text{VsA}}{\text{AVs}}$

$Q = \mathbf{254}$

Appréciation:
Le chapitre concernant les tubes mélangeurs apportait bien des nouveautés. Avant tout, il était nécessaire d'expliquer quelques principes au sujet des superhétérodynes bien que le fonctionnement de ces récepteurs sera traité plus tard. Afin que l'élève puisse comprendre la construction et le fonctionnement des tubes mélangeurs, les bases régissant le mélange doivent lui être connues. L'exercice n vous a monté comment les composants séparés – tube

et circuit oscillant – agissent ensemble. Au moyen de cet exercice, vous pouviez vérifier si vos connaissances des circuits oscillants sont encore fraîches. Les autres épreuves permettent de vérifier vos connaissances dans le domaine des tubes mélangeurs. Vous devriez pratiquer consciencieusement ce contrôle personnel.

51. Que savez-vous au sujet des tubes à atmosphère gazeuse?

Réponses aux questions a à g (page 378)

a) Un ion est un atome qui n'est pas électriquement neutre. Aux ions positifs il manque des électrons, la charge positive du noyau domine (cation). Les ions négatifs possèdent plus d'électrons qu'il n'est nécessaire pour créer l'équilibre des charges de l'atome (anion).
b) Par suite de leur charge négative, les anions sont attirés par l'anode.
c) Les cations, chargés positivement, se dirigent vers la cathode qui est polarisée négativement.
d) Lorsqu'un électron, animé d'une grande vitesse, rencontre un atome ou une molécule il peut alors leur arracher un électron périphérique, ce qui a pour effet de les ioniser. Ce processus s'appelle l'ionisation.
e) Le tube à décharge lumineuse se compose de deux électrodes placées dans une ampoule remplie de gaz.
f) Oui, l'allumage d'un thyratron peut être provoqué par une électrode spéciale d'allumage.
g) Non, lorsque l'allumage d'un thyratron a eu lieu on ne peut l'éteindre que par l'interruption du courant anodique ou en abaissant la tension sur l'anode au-dessous de la tension d'arc.

Appréciation:
Vous devriez pouvoir répondre aux questions a à c car la nature des ions a été traitée au début du cours. Les autres questions vous montrent ce que vous savez déjà au sujet des tubes ioniques.

52. Exercices de répétition concernant « VI. Les tubes à atmosphère gazeuse »

Réponses aux questions a à m (page 403)

a) Par le terme d'ionisation de choc, on entend la croissance en avalanche des porteurs de charges dans un tube ionique. L'ionisation de choc amorce l'allumage du tube.
b) La tension d'allumage est celle qu'il est nécessaire d'appliquer à un tube pour qu'il s'allume. La tension de décharge est celle qui s'établit lorsque le tube est en fonctionnement.
c) La tension d'extinction est celle pour laquelle l'ionisation cesse, le tube s'éteint. Elle se situe quelque peu au-dessous de la tension de décharge.

d)

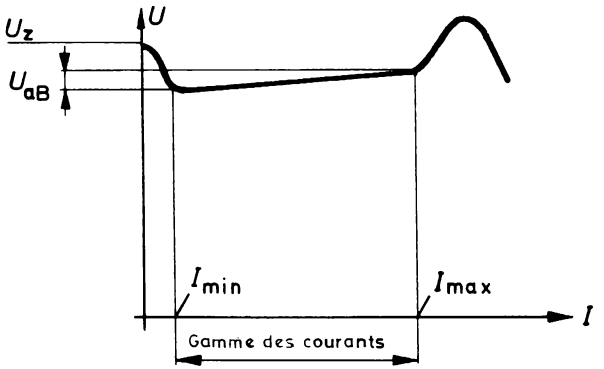


Figure pour la question 52 d

e)

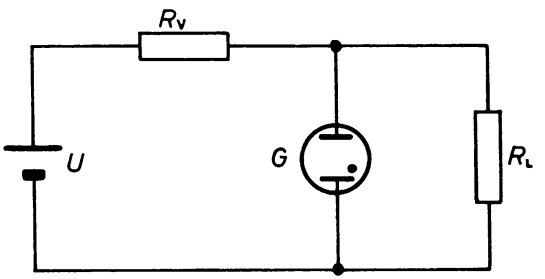


Figure pour la question 52 e

f) Le tube-relais possède une cathode froide tandis que le thyratron a besoin d'une cathode chauffée.
Le tube-relais s'allume dès que la tension sur le starter atteint la tension d'allumage. A cet instant, la tension anodique n'a pas d'influence pour autant qu'elle possède une valeur minimale. Dans les thyratrons, le déclenchement de l'allumage se fait pour n'importe quelle tension de commande sur la grille mais une tension anodique déterminée est nécessaire.
Lorsqu'un tube-relais est conducteur, une tension de décharge relativement élevée règne à ses bornes tandis qu'aux bornes d'un thyratron, la tension d'arc qui s'y trouve est beaucoup plus petite.
Les thyratrons sont utilisables pour des courants intenses.
L'allumage des thyratrons peut être déclenché avec des tensions de quelques volts sur leur grille de commande. En revanche, les tubes-relais ont besoin d'une tension de starter notablement plus élevée pour provoquer leur allumage.

g)

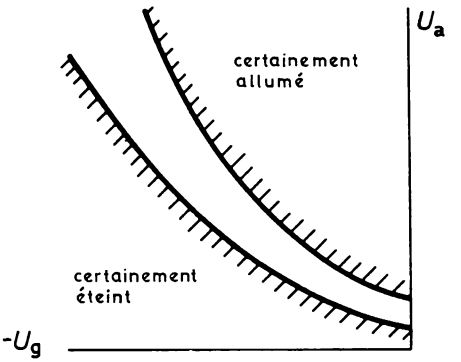


Figure pour la question 52 g

h) *Marche à suivre:*

– former le produit : courant-temps $Q = \tau_{max} \cdot I_{a_{max}}$

– introduire les valeurs et calculer $Q = 3 \cdot 6\ \text{sA}$

$Q = 18\ \text{As}$

– écrire la formule du courant d'impulsion admissible $I_{a_{imp}} = \dfrac{Q}{t_i}$ (t_i = durée d'impulsion)

– introduire les valeurs et calculer $I_{a_{imp}} = \dfrac{18}{2}\ \dfrac{\text{As}}{\text{s}}$

$I_{a_{imp}} = \mathbf{9\ A}$

– vérifier si le courant calculé ne dépasse pas la valeur de pointe du courant anodique. Celui-là étant de 9 A, il se situe donc bien en dessous de la valeur maximale de 25 A.

i) En supprimant la tension anodique, le tube s'éteint. La tension ne peut être à nouveau appliquée sur l'anode que lorsque le temps de désionisation s'est écoulé. Si l'anode reçoit une nouvelle tension avant que le temps t_d ne se soit écoulé, elle s'allume aussitôt quelle que soit la tension régnant à cet instant sur la grille de commande. Le temps de désionisation impose des limites à la fréquence de fonctionnement d'un circuit.

k) L'ignitron est allumé à l'aide d'une tension d'amorçage qui est amenée à une tige d'allumage. La tige d'allumage plonge dans le mercure de la cathode. Le courant d'allumage, intense mais bref, qui traverse la tige d'allumage vaporise un peu de mercure ce qui a pour effet de déclencher l'ionisation de choc.

l) Les ignitrons sont utilisés d'une manière générale chaque fois que des courants intenses doivent être enclenchés sans contacts mobiles. Les ignitrons sont également utilisés dans les redresseurs commandés de grande puissance.

m) Les diodes à gaz ont un meilleur rendement que les tubes à vide car la tension d'arc est notablement plus petite que la chute de tension dans un tube à vide. Par conséquent il s'ensuit que les diodes à gaz travaillent avec des courants bien plus élevés que les tubes à vide.

Appréciation:
Les exercices permettent de vérifier votre savoir et de déceler vos points faibles. Nous pouvons mesurer ces connaissances au moyen d'exercices et de problèmes. Il vous appartient de déterminer si vos connaissances sont suffisantes, les épreuves sont là pour vous y aider.

53. Que savez-vous concernant les tubes à rayons cathodiques ?

Réponses aux questions a à d (page 404)

a) Les principaux éléments du système des électrodes du tube à rayons cathodiques sont :
   - la source d'électrons ;
   - le dispositif de focalisation (optique électronique) ;
   - le dispositif de déviation (ou déflexion) ;
   - l'écran.

b) Les tubes image dont le système de déviation est statique sont ceux dans lesquels le faisceau est dévié par un champ électrique.

c) Le faisceau d'électrons d'un tube à déviation magnétique est commandé par un champ magnétique variable (alternatif ou de forme quelconque).

d) L'oscilloscope cathodique est un appareil de mesure dont les possibilités d'emploi sont universelles.

Appréciation:
Les questions préliminaires vous ont montré si vous possédiez déjà quelques notions concernant les tubes à rayons cathodiques. Si ce composant est nouveau pour vous, vous n'êtes pas désavantagé car les connaissances que vous avez acquises jusqu'à présent vont vous permettre d'étudier ce chapitre sans difficulté.

54. Exercices de répétition concernant « VII. Le tube à rayons cathodiques »

Réponses aux questions a à d (page 411)

a) La tension sur le cylindre de Wehnelt influence l'intensité du faisceau, donc la luminosité. Cette tension de polarisation négative – qui peut être comparée à celle de la grille d'un tube amplificateur – est conduite au tube image à travers un potentiomètre de réglage d'où il s'ensuit que la luminosité de l'image dépend de la position du potentiomètre.

b) La concentration du faisceau s'opère dans l'optique électronique. Dans le plus simple des cas, celle-ci se compose d'une électrode de concentration et d'une anode. L'anode reçoit une tension plus élevée que celle qui arrive sur l'électrode de concentration. Le champ électrique qui règne entre ces deux électrodes provoque une focalisation du faisceau électronique. Un potentiomètre de réglage permet d'ajuster la tension qui arrive sur l'électrode de focalisation. Puisque le faisceau qui passe à travers le champ de l'optique électronique peut être influencé, la netteté de l'image se règle au moyen de ce potentiomètre.

c) Le pôle positif de la tension de déviation est relié à la plaque de droite. Le champ électrique exerce une attraction sur le faisceau ce qui a pour effet de le dévier vers la droite.
Le coefficient de déviation est égal au quotient de la tension de déviation par la distance de déviation du faisceau sur l'écran.

$$A_F = \frac{250\ \text{V}}{4\ \text{cm}}$$

$$A_F = \mathbf{62{,}5\ V/cm}$$

d) *Marche à suivre:*
Première étape : dessiner la tension aux plaques de déviation verticale
– calcul de l'amplitude

– écrire la formule de base $A_{Fv} = \frac{U_p}{Y}$

– extraire U_p de la formule $U_p = A_{Fv} \cdot Y$

– introduire les valeurs et calculer $U_p = 60 \cdot 5\ \frac{\text{V}}{\text{cm}} \cdot \text{cm}$

$$U_p = \mathbf{300\ V_{pp}}$$

– calculer la durée de la période

– écrire la formule de base $f = \frac{1}{T}$

– extraire T de la formule $T = \frac{1}{f}$

– introduire les valeurs et calculer $T = \frac{1}{150 \cdot 10^3}\ \frac{1}{1/\text{s}}$

$$T = \mathbf{6{,}67\ \mu s}$$

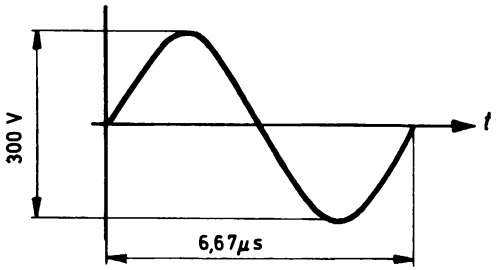


Figure 1 pour la question 54 d

Deuxième étape: dessiner la tension aux plaques de déviation horizontale
- calculer l'amplitude
- écrire la formule de base $A_{Fh} = \frac{U_p}{Y}$
- extraire U_p de la formule $U_p = A_{Fh} \cdot Y$
- introduire les valeurs et calculer $U_p = 70 \cdot 6 \frac{V}{cm} \cdot cm$

$$U_p = \mathbf{420\ V_{pp}}$$

- la durée de la période coïncide avec celle de la tension de déviation verticale puisque l'image visible se présente avec une oscillation complète.

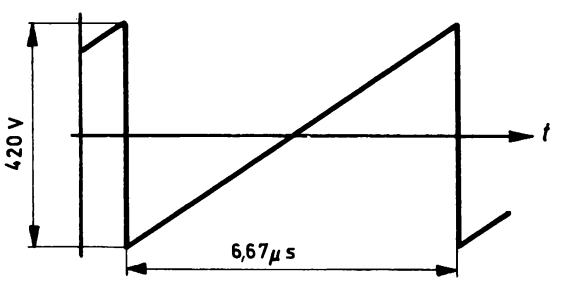


Figure 2 pour la question 54 d

Appréciation:
Les exercices de répétition vous ont montré si vous avez compris le montage et le fonctionnement des tubes à rayons cathodiques. Vos nouvelles connaissances doivent vous permettre de discerner les causes qui donnent naissance à une image sur l'écran d'un tube cathodique. Au cours de votre instruction ultérieure, vous apprendrez à connaître l'oscilloscope cathodique et ses possibilités d'emploi. Les bases qui permettent de comprendre cet appareil à usages multiples sont la connaissance du tube à rayons cathodiques.

H. Dispositions finales

[1] Ce règlement entre en vigueur le 1er octobre 1974.
[2] L'entrée en vigueur de ce règlement abroge celui portant le N° 65.8 « Electronique générale I ».

Le chef de l'instruction :

Colonel commandant de corps Hirschy